



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias de la Ingeniería para la Gestión de los Recursos Hídricos

Modelación del flujo de agua y nitrato en el suelo de la microcuenca Cuevas en el sur de los Andes ecuatorianos empleando Hydrus 1D

Tesis previa a la obtención del grado de Magister en Investigación en
Ciencias de la Ingeniería para la Gestión de los Recursos Hídricos

Autor: Ing. Edison Fernando Amay Izquierdo

CI: 0106628209

Director: Ing. Armando Molina Verdugo PhD

CI: 0102347796

Codirector: Ing. Diego Esteban Mora Serrano PhD

CI: 0102423506

Cuenca – Ecuador

2018

RESUMEN

Con el propósito de estudiar una dinámica integral entre los factores suelo y agua en los ecosistemas alto Andinos, esta investigación se enfocó en la modelación del flujo de agua y el transporte de nitrato a través de la solución del suelo sub superficial de la microcuenca Cuevas (4.2 km²), al sur de los Andes ecuatorianos. El modelo Hydrus 1D fue empelado para modelar el contenido de agua y el transporte del nitrato a través del perfil del suelo en treinta catenas de prueba distribuidas en la microcuenca bajo las coberturas de páramo, bosque y almohadilla. El modelo ha demostrado ser capaz de alcanzar ajustes aceptables, considerando el índice de error PBIAS, empleando modelación inversa en la optimización de parámetros de pedotransferencia. Los resultados obtenidos revelan que el suelo bajo la cobertura de bosque estaría almacenando un mayor porcentaje de agua, de hasta un 10% más que el alcanzado bajo las coberturas de páramo y almohadilla; por otro lado, el nitrato parece consumirse más bajo la cobertura de almohadilla. La investigación supone un importante avance en el estudio integral de cuencas hídricas; los hallazgos, métodos y limitaciones encontrados en este trabajo podrían ayudar en la planeación de futuras investigaciones dentro del eje de la modelación hidrológica y geoquímica.

Palabras clave: flujo de agua, transporte de nitrato, modelación, Hydrus 1D, modelación inversa

ABSTRACT

With the purpose of studying an integral dynamics between the soil and water factors in the high Andean ecosystems, this research focused on the modeling of water flow and nitrate transport through the sub surface soil solution of the Cuevas microbasin (4.2 km²), in the south of the Ecuadorian Andes. The Hydrus 1D model was used to model the water content and the transport of nitrate through the soil profile in thirty monitoring points distributed in the microbasin under the coverings of páramo, polylepis forest and cushion. The model has been shown to be capable of achieving acceptable adjustments, considering the PBIAS error index, using inverse modeling in the optimization of pedotransference parameters. The results obtained reveal that the soil under the forest cover would be storing a greater percentage of water, up to 10% more than that reached under the coverings of páramo and cushion; On the other hand, nitrate seems to be consumed more under the cushion coverage. The investigation supposes an important advance in the integral study of watersheds; the findings, methods and limitations found in this work could help in the planning of future research within the axis of hydrological and geochemical modeling.

Keywords: water flow, nitrate transport, modeling, Hydrus 1D, inverse modeling



CONTENIDO

RESUMEN	2
1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 Importancia del estudio.....	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo General.....	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
2 METODOLOGÍA.....	12
2.1 Área de estudio	12
2.2 Recopilación de información	13
2.2.1 Datos meteorológicos	13
2.2.2 Monitoreo de muestras de agua en el suelo y muestreo de suelos	14
2.3 Modelación	20
3 RESULTADOS	24
3.1 Observaciones de tensión y concentración de nitrato monitoreadas en el periodo de estudio.....	25
3.2 Evaluación del ajuste alcanzado en la modelación de las tensiones y concentración de nitrato	27
3.3 Parámetros hidrofísicos y de transporte optimizados por el modelo	33
3.4 Flujos de agua diarios y acumulados durante el periodo de estudio.....	37
3.5 Cargas promedio diarias de nitrato y acumuladas al final de periodo de estudio..	43
4 Discusión	45
5 Conclusiones, observaciones y recomendaciones	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudio.....	13
Figura 2: series de datos climáticos obtenidos de la estación meteorológica Can Can.....	14
Figura 3: distribución de las toposecuencias de suelo, coberturas de suelo y mapa de pendientes (información obtenida por el proyecto “ <i>Impacto antropogenico en la meteorización química y formación del suelo en suelos volcánicos</i> ”)	15
Figura 4: distribución de pendientes por punto de monitoreo	17
Figura 5: Clasificación de los horizontes según la textura del suelo.....	18
Figura 6: modelo conceptual del del flujo de agua y el transporte de nitrato.....	21
Figura 7: tensiones monitoreadas en las calicatas durante el periodo de estudio.....	25
Figura 8: distribución de las tensiones monitoreadas en cada punto de monitoreo	26
Figura 9: distribución de la concentración de nitrato en cada punto de monitoreo	26
Figura 10: concentración de nitratos en las muestras de la solución del suelo analizadas *Corresponde a la concentración de nitrato en el agua de lluvia	27
Figura 11: distribución del desempeño alcanzado mediante modelación inversa.....	28
Figura 12: Ajuste de la tensión en el suelo simulada (línea azul) mediante modelación inversa a la observada (línea negra) a una profundidad de 50 cm en las catenas bajo cobertura de páramo	29
Figura 13: Ajuste de la tensión en el suelo simulada (línea azul) mediante modelación inversa a la observada (línea negra) a una profundidad de 50 cm en las catenas bajo las coberturas de bosque y almohadilla	30
Figura 14: Ajuste de concentración de nitrato en el suelo simulada (línea azul) mediante modelación inversa a la observada (línea negra) a una profundidad de 50 cm en las catenas bajo cobertura de páramo	31
Figura 15: Ajuste de concentración de nitrato en el suelo simulada (línea azul) mediante modelación inversa a la observada (línea negra) a una profundidad de 50 cm en las catenas bajo cobertura de bosque y almohadilla	32
Figura 16: distribución del contenido de saturación de agua (θ_s) y de agua residual (θ_r) optimizado bajo cada cobertura y estrato de suelo	34
Figura 17: distribución de la conductividad saturada optimizada por tipo de cobertura y horizonte	34
Figura 18: curvas pF de los horizontes A, AC y C bajo las coberturas de páramo, almohadilla y bosque.....	35
Figura 19: distribución de la densidad aparente del suelo según la cobertura y horizonte .	36
Figura 20: distribución de la dispersividad longitudinal en cada horizonte de suelo bajo las distintas coberturas	36
Figura 21: distribución de las tasas de decaimiento de primer orden optimizadas bajo cada cobertura y horizonte	37

Figura 22: infiltración (I), evaporación potencial (Ep), escorrentía (E) y Almacenamiento (S) simuladas por cobertura.....	39
Figura 23: Infiltración (I), Evaporación potencial (Ep), escorrentía superficial (E), y Almacenamiento (S) acumulados por cobertura	40
Figura 24: Infiltración (I), Evaporación potencial (Ep), escorrentía (E), y Almacenamiento (S) acumulados según la topografía.....	41
Figura 25: infiltración (I), evaporación potencial (Ep), escorrentía (E) y Almacenamiento (S) promedios simulados según la topografía.....	42
Figura 26: concentración diaria promedio de nitrato por cobertura de suelo.....	43
Figura 27: concentración promedio diaria de nitrato por topografía.....	44
Figura 28: carga promedio anual de nitrato lixiviado por tipo de cobertura y posición topográfica	45
Figura 29: correlación entre el flujo acumulado de los procesos en los 27 puntos de monitoreo y la pendiente bajo la cual estos se ubican	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Descripción de los horizontes por calicata	16
Tabla 2: Parámetros hidrofísicos de los horizontes A, AC y C para el suelo Andosol	17
Tabla 3: Dispersitividad promedio de cada textura de suelo.....	19
Tabla 4: densidad aparente (ρ) y dispersividad para cada horizonte de suelo.....	19
Tabla 5: Clasificación general del desempeño de NSE, PBIAS y RSR, para un desempeño mensual (Moriasi et al., 2007)	24
Tabla 6: evaluación del ajuste del modelo en la simulación de tensiones y nitrato en los puntos de monitoreo	33
Tabla 7: Parámetros hidrofísicos promedios del suelo referentes al modelo de (Van Genuchten, 1980)	35
Tabla 8: densidad aparente (ρ), dispersividad longitudinal (D_L), y constante de decaimiento de primer orden (μ_w) bajo cada cobertura y horizonte de suelo	37
Tabla 9: Valor acumulado de las variables al final del periodo (mm)	40
Tabla 10: Valor acumulado de las variables al final del periodo (mm) según ubicación en la ladera	41

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Edison Fernando Amay Izquierdo, autor del trabajo de titulación “MODELACIÓN DEL FLUJO DE AGUA Y NITRATO EN EL SUELO DE LA MICROCUENCA CUEVAS EN EL SUR DE LOS ANDES ECUATORIANOS EMPLEANDO HYDRUS 1D”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 19 de septiembre de 2018



Edison Fernando Amay Izquierdo

C.I: 0106628209

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Edison Fernando Amay Izquierdo, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “MODELACIÓN DEL FLUJO DE AGUA Y NITRATO EN EL SUELO DE LA MICROCUENCA CUEVAS EN EL SUR DE LOS ANDES ECUATORIANOS EMPLEANDO HYDRUS 1D”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 19 de septiembre de 2018



Edison Fernando Amay Izquierdo

C.I: 0106628209

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es bien conocida la importancia de los ecosistemas de alta montaña. En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y Desarrollo (UNCED, Río de Janeiro, 2001), se enfatiza que las montañas son fuentes vitales de agua, energía, minerales y productos agrícolas, constituyéndose en reservas de diversidad biológica. Los sistemas montañosos alrededor del mundo sufren cierto grado de degradación ambiental, debido principalmente al cambio climático (Viviroli et al., 2011) y los cambios de la cobertura de la tierra (Molina et al., 2015); estos cambios alteran significativamente el papel de la montañas como fuentes reguladoras de los recursos hídricos y otros servicios ambientales. Las áreas montañosas cubren cerca del 25% de la superficie terrestre y proveen sustento vital para cerca del 26% de la población mundial de manera directa y para más de la mitad de forma indirecta; en regiones áridas las montañas proporcionan entre el 90 y 100% de las necesidades de agua dulce en tierras bajas (Beniston et al., 1997; Diaz et al., 2003). Además, las variaciones fuertes del clima con la altitud en distancias horizontales relativamente cortas provoca variaciones considerables sobre su vegetación e hidrología, generando endemismo de especies y por tanto ecosistemas muy diversos con una riqueza física y biológicamente muy amplia (Beniston, 2003).

En la cordillera de los Andes, el páramo cubre las partes más elevadas (> 3200 m) entre el bosque andino y las nieves perpetuas (Podwojewski y Poulénard, 2000), formando un corredor discontinuo o fragmentado que va desde la Cordillera de Mérida en Venezuela hasta la depresión de Huancabamba en Perú (Buytaert et al., 2006). Ecuador posee aproximadamente el 33.6 % de los cerca de 41521 km² de páramo que existen en los cuatro países mencionados (Cuesta et al., 2014). A nivel nacional, el páramo representa cerca del 5% del territorio Ecuatoriano y se distribuye en 18 de las 24 provincias, concentrándose aproximadamente el 68% entre Napo, Azuay y Morona Santiago. La vegetación está formada por prados de altura (neotropical alpine grasslands) dominados en su mayoría por pajonales que están constituidos por gramíneas formadoras de penachos que crecen en condiciones climáticas adversas. Su clima está caracterizado usualmente con precipitaciones moderadas, una temperatura y evaporación baja, y una alta humedad (Podwojewski y Poulénard, 2000).

En el Ecuador, los suelos de páramo evolucionan de norte a sur y están condicionados por la geoquímica y la edad del material volcánico (Podwojewski y Poulénard, 2000). En el norte y centro del país, los suelos se desarrollan sobre depósitos de ceniza volcánica de la época del holoceno y frecuentemente se rejuvenecen con nuevos aportes de erupciones volcánicas recientes. Sin embargo, hacia el sur del país donde la actividad volcánica ha cesado, los suelos se desarrollan tanto en depósitos de ceniza volcánica como en rocas volcanoclásticas más antiguas (Podwojewski y Poulénard, 2000; Buytaert et al., 2005).

Los páramos están constituidos por andosoles e histosoles como los tipos de suelos predominantes, pero en laderas con fuertes pendientes a menudo se encuentran leptosoles y regosoles (Beltrán et al., 2009). Sus características son muy variables, destacándose principalmente la alta capacidad de almacenamiento del carbono debido a la lenta descomposición de la materia orgánica por causa de las bajas temperaturas y la formación de

complejos orgánicos-alumínicos (Llambí et al., 2012). Estas características desempeñan un rol importante en sus funciones de almacenamiento y regulación hídrica, haciendo del páramo una fuente natural de agua para millones de habitantes en los Andes. Ciudades como Quito, Cuenca, Bogotá, Medellín y Piura dependen directamente de ellos para su abastecimiento de agua (Armijos y De Bièvre, 2014). Su importancia es evidente, no solo a nivel hidrológico sino también en el ámbito socio cultural e interés científico (Llambí et al., 2012).

En la actualidad, actividades humanas como la ganadería, agricultura y la minería están amenazando la funcionalidad de este ecosistema (Armijos y De Bièvre, 2014). Además, el impacto del cambio climático sobre patrones de temperatura, regímenes de precipitación, nubosidad, entre otros, podría agravar la presión humana, poniendo en riesgo el modo de vida de pueblos altamente dependientes de sus servicios ambientales (Hofstede et al., 2014). Aunque existe aún una alta incertidumbre sobre los efectos potenciales del cambio climático sobre los páramos, existe la certeza de que los ecosistemas más afectados por este serán los de alta montaña (Beniston, 2003; Bradley et al., 2006).

A pesar de estar considerados entre los ecosistemas de alta montaña más diversos del mundo, los ecosistemas de páramo son muy poco conocidos (Llambí et al., 2012). Aunque en las últimas décadas la investigación sobre el páramo se ha incrementado en el ámbito de la regulación hídrica y los impactos antrópicos sobre el mismo (W. Buytaert et al., 2005; Buytaert et al., 2006; Crespo et al., 2010), todavía falta por entender como factores climáticos, geológicos, edafológicos, ecológicos y socioculturales interaccionan entre sí y afectan su rol regulador (Armijos y De Bièvre, 2014). Particularmente, estudios que enlacen los flujos de agua con los flujos de solutos en el suelo son prácticamente inexistentes (Sevink et al., 2014). Dada la creciente presión humana sobre los páramos, es primordial contar con una línea base sobre el estado actual de la calidad del agua y su relación con las características litológicas, climáticas y de la vegetación en este sistema (Cammeraat et al., 2014). En este aspecto, la investigación enfocada en la comprensión integral de la hidrología y la geoquímica de los suelos de páramo es de fundamental importancia.

Con el propósito de tener una mejor comprensión sobre la hidrología de los páramos Andinos y las cuencas de montaña, en la actualidad es común el uso de modelos computacionales. Se han empleado para el análisis de procesos lluvia- escorrentía a escala de cuenca hidrográfica (Vázquez y Feyen, 2010; Buytaert y Beven, 2011; Céleri et al., 2015), para la evaluación de los procesos de erosión (Poulenard et al., 2001) y los posibles impactos del cambio climático sobre eventos extremos (Mora et al., 2014), y recientemente para la evaluación de fuentes de generación de escorrentía a través del uso de trazadores isotópicos (Mosquera et al., 2015).

En el páramo, especialmente en las laderas, dada la variabilidad del espesor del suelo y una ausencia del nivel freático de agua, definir una zona vadosa resultaría difícil. Se entiende por zona vadosa del suelo a la zona entre la superficie del suelo y el nivel freático, siendo de este modo considerada una zona no saturada o de aireación (Dippenaar et al., 2014). Iñiguez et al., (2008) resaltan que los flujos de agua predominantes en estas condiciones de ladera se llevarían a cabo mayormente mediante flujo subsuperficial. Independiente de su profundidad, la zona

vadosa es de vital importancia no solo para el flujo de agua sino también porque en ella se desarrollan complejos procesos biogeoquímicos entre plantas, microorganismos y minerales en el suelo.

Estudios sobre los flujos de agua y solutos a través del suelo han cobrado interés en las últimas décadas. Diferentes modelos hidrológicos han sido empleados para simular el movimiento de los flujos de agua y solutos dentro de la zona vadosa en el suelo. Entre los más conocidos tenemos el SWAP (Van Dam et al., 1997), Mike She (Graham y Butts, 2005), Hydrus 1D (Šimůnek et al., 2009), Hydrus 2D/3D (Šimůnek et al., 2006). En la actualidad, el modelo Hydrus 1D (Šimůnek et al., 2009) es ampliamente utilizado para la evaluación de la contaminación del suelo y el agua superficial.

A nivel mundial se registran numerosas investigaciones científicas en las cuales se hace uso de Hydrus 1D en el estudio de solutos en el suelo, particularmente el nitrato. El interés por estudiar el transporte de nitrato se ha incrementado debido a la creciente demanda agrícola, y el potencial impacto que la lixiviación de nutrientes podría tener sobre el suelo y el agua subterránea por la aplicación de fertilizantes. El uso del modelo en la simulación del transporte de nitrato involucra además la simulación del flujo de agua en el suelo, y la necesidad de sus parámetros físicos. Entre sus aplicaciones se encuentran el estudio del transporte de nitrógeno en zona vadosa (Heatwole y McCray, 2007), balance de nitrógeno en campos de cultivo (Li et al., 2015a), lixiviación de nitrato bajo determinadas prácticas de riego (Tafteh y Sepaskhah, 2012), y la evaluación de la ferti irrigación de cultivos (Hanson et al., 2006). Las investigaciones citadas han demostrado la capacidad del modelo para ajustar las simulaciones a las observaciones obtenidas en campo o laboratorio.

A nivel regional, investigaciones que aborden el transporte de solutos en el suelo son prácticamente inexistentes (Sevink et al., 2014). Hay entonces un campo no explorado y muy amplio para la investigación de los procesos que rigen el flujo de agua y transporte de solutos en los páramos Ecuatorianos y de la región. A nivel local, la aplicación de Hydrus 1D ha estado enfocada en el flujo de agua en ladera. Así por ejemplo, Cisneros et al. (2001) lo emplearon en la modelación del flujo subsuperficial en laderas mayores al 12% como alternativa de riego en alta montaña. Sin embargo no se registran investigaciones en las cuales el modelo sea usado en la simulación del transporte o lixiviación de solutos en la matriz del suelo.

1.1 Importancia del estudio

Esta investigación contribuirá a un avance y aporte muy importante para el conocimiento científico sobre la hidrología de cuencas alto andinas en los Andes tropicales, considerando además, el transporte de solutos como el nitrato en la interfaz agua-suelo.

El conocimiento generado, contribuirá a entender de una manera más integral la interacción entre el clima, suelo y plantas que ocurren en un ecosistema de páramo en el sur del Ecuador. Esto a su vez mejoraría la planeación de investigaciones futuras enfocadas al estudio de tales interacciones y su impacto sobre los roles ecosistémicos del páramo. Además, la mejor comprensión del sistema llevaría a científicos y técnicos a formular planes de manejo adecuados

del recurso suelo y agua, que permitan establecer lineamientos de conservación y recuperación de estos ecosistemas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Contribuir a mejorar la comprensión de la dinámica del transporte de agua y nitrato bajo las coberturas de pajonal, bosque de polylepis y almohadilla en cuencas alto Andinas

1.2.2 Objetivos específicos

- Establecer una base de datos con información hidrometeorológica e hidrofísica del suelo y química en la solución del suelo
- Implementar y optimizar el modelo hidrológico Hydrus 1D para simular los flujos de agua y nitrato en el perfil del suelo
- Evaluar la relación entre el transporte de agua y el nitrato bajo condiciones diferentes de tipo de cobertura y posición topográfica

2 METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El área de estudio (Figura 1) se conoce como la microcuenca Cuevas, y está ubicada al suroeste del Ecuador, en la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Yanuncay, la cual es considerada una fuente importante de agua para la ciudad de Cuenca. Posee una extensión de 4.2 km², siendo sus coberturas vegetales predominantes el pajonal (76%, en adelante páramo) y las plantas de almohadilla (7%), mientras pequeñas áreas de bosque de polylepis (1.3%) solamente se encuentra en la parte alta de la cuenca (ver Figura 3). Su altitud varía entre los 3603 y los 3949 m.s.n.m. (metros sobre el nivel de mar), presenta pendientes relativamente suaves menores a 10° alrededor de los valles y no mayores a 34° en las laderas; presenta también un régimen de precipitación alto Andino bimodal (Celleri et al., 2007). Entre los años 1997 y 2013, la precipitación media anual registrada en la zona ascendió a los 887 mm, siendo su máxima y mínima 1237 mm y 466 mm, respectivamente. La temperatura presenta grandes variaciones entre el día y la noche, pudiendo estas llegar a 18 y 0 °C, respectivamente. El suelo está formado sobre rocas andesíticas, las cuales quedaron expuestas luego de las últimas glaciaciones. El suelo predominante es el Andosol no alofánico (Poulenard et al., 2003) en las laderas, mientras que en los valles se pueden encontrar Histosoles.

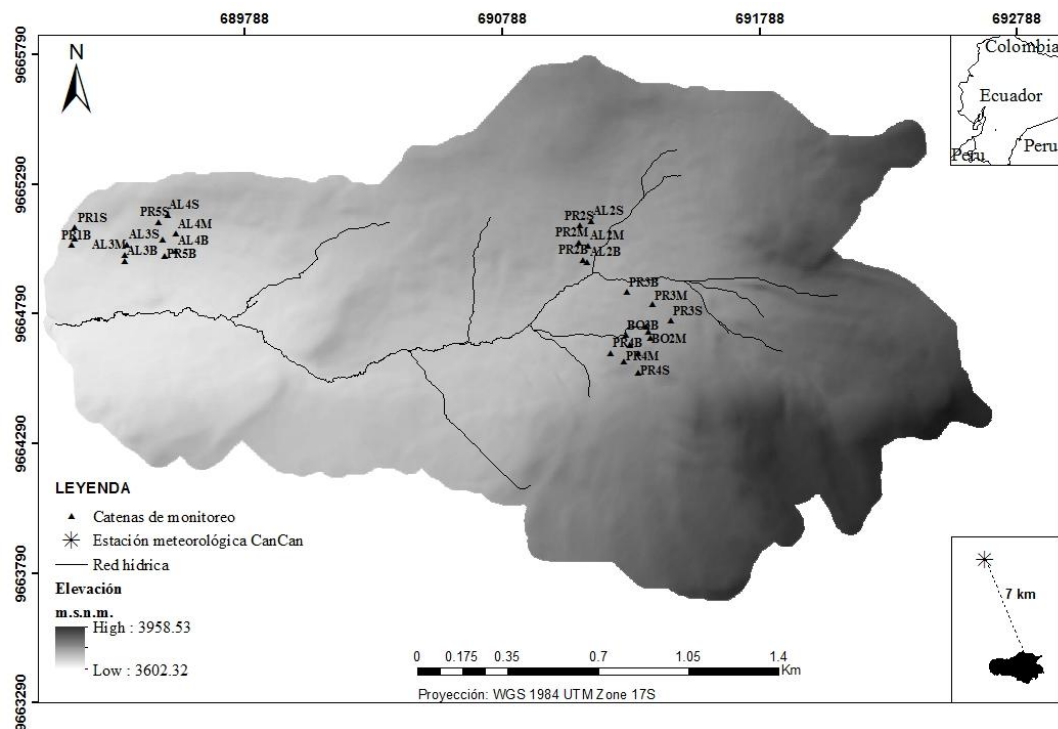


Figura 1: Área de estudio

2.2 Recopilación de información

Con el fin de preparar los datos de entrada para la modelación, se recopilaron y depuraron datos meteorológicos, información diaria de precipitación, temperatura, radiación solar, y humedad relativa. Además se dispuso de información de humedad del suelo a través de mediciones de la tensión y mediciones de concentraciones de nitrato en la solución del suelo. A continuación, se describe de manera concreta la recopilación de la información.

2.2.1 Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos fueron proporcionados por ETAPA EP (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca). Información de la estación meteorológica Can Can ubicada a 7 km de distancia de la cuenca de estudio fue recopilada para el período entre octubre del 2012 y diciembre del 2013. Datos de temperatura, lluvia, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa fueron obtenidos a una resolución horaria, luego esta información fue agregada para obtener información a nivel diario. Esta información es la que se utiliza en los análisis posteriores. Además se utilizó una estación pluviométrica, propiedad de la red hidrometeorológica del Programa para el Manejo del Agua y Suelo de la Universidad de Cuenca (PROMAS-UCUENCA) que fue instalada en la cuenca de estudio desde enero de 2013, sin embargo su tiempo de funcionamiento no cubría todo el periodo de análisis de este estudio, por lo que se utilizó los datos de lluvia de esta última para contrastar con la información de la estación Can Can obteniendo una correlación de 0.9. Las series de tiempo se presentan en la Figura 2; la precipitación caída durante el periodo alcanzó los 546 mm, una cifra cercana al mínimo registrado entre 1997 y 2013.

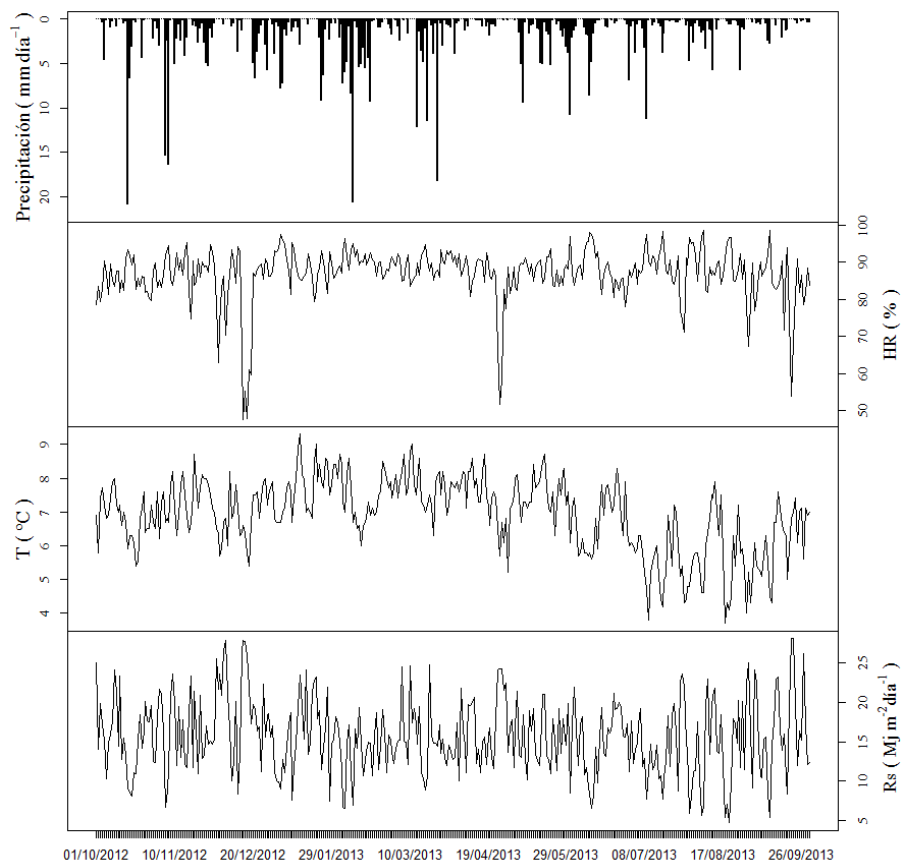


Figura 2: series de datos climáticos obtenidos de la estación meteorológica Can Can

2.2.2 Monitoreo de muestras de agua en el suelo y muestreo de suelos

Entre el año 2012 y 2013 se realizó una campaña de muestreo y monitoreo dentro del proyecto de investigación denominado “*Impacto antropogenico en la meteorización química y formación del suelo en suelos volcánicos*”, financiado parcialmente por la Fundación von Humboldt de Alemania y la Senescyt (Investigador Prometeo). Esta campaña consistió primeramente en establecer sitios para el muestreo de suelos y recolección de muestras de agua en el suelo. Se seleccionaron 10 toposecuencias o catenas de suelo (Figura 3). Cinco bajo la cobertura de pajonal de páramo (PR), tres bajo plantas de almohadillas (AL) y dos bajo el bosque de polylepis (BO). Por cada toposecuencia se realizaron 3 perfiles de suelo (calicatas), localizadas en la parte alta, media y baja de la ladera. En total se excavaron 30 perfiles de suelo hasta alcanzar la profundidad del frente meteorizado del suelo o el horizonte C. Por cada horizonte encontrado en el perfil del suelo se tomaron muestras de suelo para análisis físico-químico e hidrofísico. Los perfiles del suelo fueron descritos basados en los horizontes genéticos mediante los procedimientos del World Reference Base (FAO, 2006). Luego de los análisis de suelo en el laboratorio, se clasificó el tipo de suelo como Andosol no alofánico.

Para cada perfil del suelo (calicata) se instaló un lisímetros de succión de copa de cerámica y un tensiómetro (P80 ceramic, maximum pore size 1 μm ; CeramTec AG, Marktreidwitz, Germany). El primero nos permite recolectar muestras de agua en la solución del suelo y el

segundo nos permite medir la tensión en el suelo para determinar la humedad del mismo. El agua en la solución del suelo fue recolectada luego de aplicar un vacío o succión de 40 kPa a las botellas de recolección. Adicionalmente se tomaron muestras de agua de la lluvia para analizar el aporte de nitrato en el suelo. El monitoreo para la recolección de las muestras de agua y las mediciones de las tensiones en el suelo se llevaron a cabo dos veces por mes durante la época lluviosa y una vez por mes en la época seca, a una profundidad de 50 cm. Las muestras de agua fueron enviadas al laboratorio para el análisis del nitrato utilizando un ICP-AES (espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente).

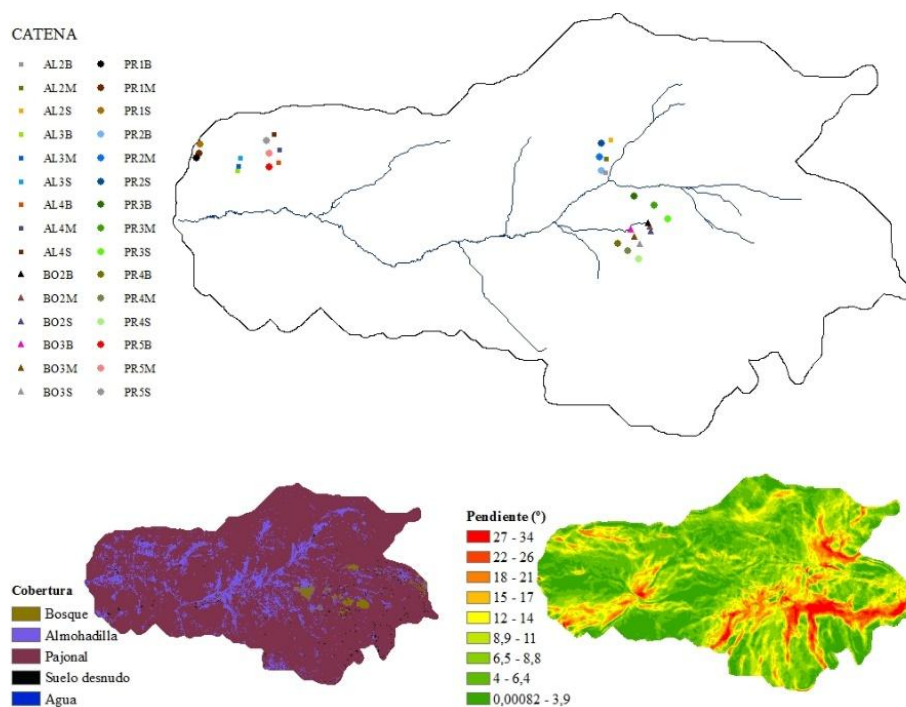


Figura 3: distribución de las toposecuencias de suelo, coberturas de suelo y mapa de pendientes (información obtenida por el proyecto “Impacto antropogenico en la meteorización química y formación del suelo en suelos volcánicos”

Los horizontes de suelo A, AC y C, y su profundidad fueron identificados y registrados en cada calicata, estos se detallan en la Tabla 1. Las profundidades totales van desde los 57 cm a los 120 cm, siendo por lo general menores en las calicatas localizadas en la parte alta de la toposecuencia.

Se puede resumir las características de cada horizonte como sigue (FAO, 2009): el horizonte A es aquel que se caracteriza por una acumulación de materia orgánica mezclada con fracción mineral; el horizonte C es uno mineral poco afectado por los procesos pedogenéticos; por último la capa AC representa un horizonte de transición, donde se exhibe características de los horizontes A y C.

Tabla 1: Descripción de los horizontes por calicata

Código	Calicata		Cobertura	Horizonte-profundidad (cm)			Pendiente (°)
				A	AC	C	
BO2S	BO2	Superior	Bosque	0-30	30-50	50-75	21.78
BO2M	BO2	Media	Bosque	0-40	40-55	55-85	7.64
BO2B	BO2	Baja	Bosque	0-73	73-93	93-113	17.59
BO3S	BO3	Superior	Bosque	0-40	40-60	60-85	13.00
BO3M	BO3	Media	Bosque	0-45		45-90	19.83
BO3B	BO3	Baja	Bosque	0-45	45-65	65-85	7.45
PR1S	PR1	Superior	Páramo	0-27		27-63	7.31
PR1M	PR1	Media	Páramo	0-46	46-66	66-81	10.72
PR1B	PR1	Baja	Páramo	0-29	29-54	54-74	9.27
PR2S	PR2	Superior	Páramo	0-37	37-85	85-115	5.93
PR2M	PR2	Media	Páramo	0-40	40-100	100-120	7.30
PR2B	PR2	Baja	Páramo	0-45	45-75	75-105	6.95
PR3S	PR3	Superior	Páramo	0-65		65-85	9.01
PR3M	PR3	Media	Páramo	0-60		60-100	6.66
PR3B	PR3	Baja	Páramo	0-30	30-45	45-85	5.86
PR4S	PR4	Superior	Páramo	0-30	30-55	55-95	11.35
PR4M	PR4	Media	Páramo	0-60	60-95	95-115	17.79
PR4B	PR4	Baja	Páramo	0-55	55-80	80-100	15.60
PR5S	PR5	Superior	Páramo	0-37	37-62	62-87	7.23
PR5M	PR5	Media	Páramo	0-39	39-57	57-77	11.30
PR5B	PR5	Baja	Páramo	0-37	37-52	52-67	8.65
AL2S	AL2	Superior	Almohadilla	0-35		35-72	13.09
AL2M	AL2	Media	Almohadilla	0-25	25-40	40-85	9.20
AL2B	AL2	Baja	Almohadilla	0-25	25-40	40-80	5.08
AL3S	AL3	Superior	Almohadilla	0-37		37-62	11.37
AL3M	AL3	Media	Almohadilla	0-37	37-57	57-77	11.32
AL3B	AL3	Baja	Almohadilla	0-30	30-43	43-68	6.42
AL4S	AL4	Superior	Almohadilla	0-27	27-43	43-67	15.45
AL4M	AL4	Media	Almohadilla	0-27	27-42	42-59	8.90
AL4B	AL4	Baja	Almohadilla	0-27	27-41	41-57	9.23

*Muestreo y levantamiento de información realizado por un grupo de investigadores dentro del proyecto “*Impacto antropogenico en la meteorización química y formación del suelo en suelos volcánicos*”

La Figura 4 presenta la distribución de las pendientes a lo largo de las toposecuencias de suelo. También se indica las ubicaciones de las calicatas en la microcuenca Cuevas. Se puede observar que en su mayoría estas son menores a 10°, siendo la máxima igual a 22° y la media de 8°.

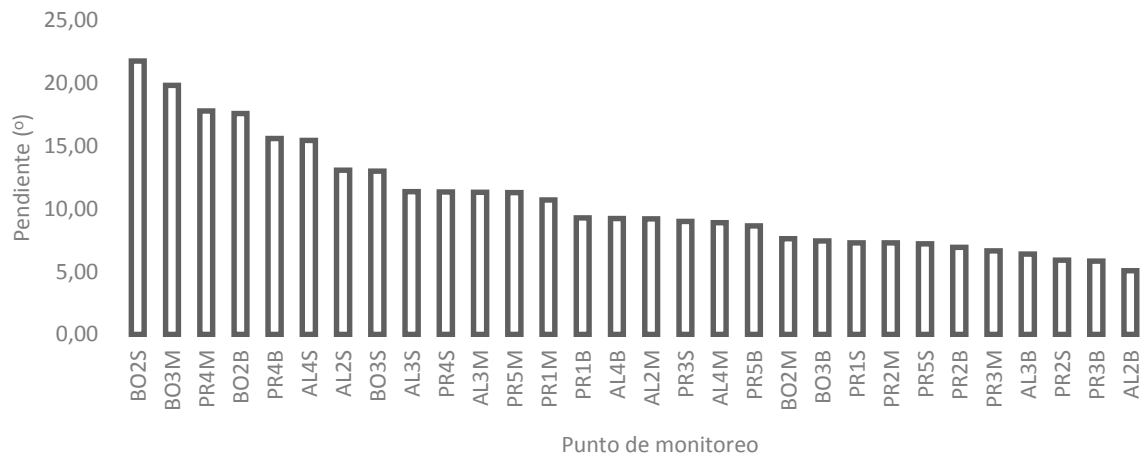


Figura 4: distribución de pendientes por punto de monitoreo

3.2.3. Parámetros hidrofísicos y de pedotransferencia

Dado que los parámetros hidrofísicos del suelo de: conductividad saturada (K_s), contenido de agua residual (θ_r) y de saturación (θ_s), y los parámetros empíricos α , n y m , referentes al modelo de (Van Genuchten, 1980), no se encontraron disponibles para la cuenca de estudio, estos fueron recopilados de la base de datos del proyecto IAMGOLD (IAMGOLD, 2009), cercano a la zona de estudio. Así, de un total de 22, 3, y 5 muestras tomadas dentro de ese proyecto para los estratos A, AC y C, respectivamente, se obtuvieron sus máximos, mínimos y sus promedios con el fin de establecer límites de variación en el proceso de modelación inversa (mencionado más adelante). Estos corresponden al tipo de suelo Andosol, y se detallan en la Tabla 2. Dada la cercanía de los sitios de muestreo de suelos del proyecto IAMGOLD que se localizan aproximadamente a 7 km de distancia de la microcuenca Cuevas, se puede asumir que el suelo se ha formado sobre un mismo material parental de origen volcánico y bajo condiciones climáticas similares. Por lo tanto, se considera que el uso de estos datos es adecuado para el propósito de esta tesis.

Tabla 2: Parámetros hidrofísicos de los horizontes A, AC y C para el suelo Andosol

Número de muestras	Horizonte		θ_r	θ_s	α	n	m	K_s (cm/h)
22	A	Promedio	0.3698	0.7875	0.0009	2.4400	0.5674	0.9680
		Mínimo	0.0000	0.6250	0.0006	1.2021	0.1681	0.2300
		Máximo	0.5020	0.9010	0.0020	3.2629	0.6935	2.3200
3	AC	Promedio	0.2055	0.7918	0.0015	1.5739	0.3259	1.2503
		Mínimo	0.0000	0.7460	0.0011	1.1889	0.1589	0.3910
		Máximo	0.4420	0.8370	0.0020	2.0100	0.5025	2.2120
5	C	Promedio	0.1602	0.6485	0.0104	1.6329	0.3598	0.7630
		Mínimo	0.0000	0.6030	0.0005	1.1313	0.1160	0.4000
		Máximo	0.3720	0.6890	0.0582	2.0215	0.5053	1.6000

La densidad relativa aparente de cada horizonte fue de igual forma tomada de la base de datos mencionada. Por otro lado, la dispersitividad longitudinal, un parámetro fundamental en modelos de transporte que emplean la ecuación de convección – dispersión y que explica el impacto de la heterogeneidad de los medios porosos sobre la dispersión de los solutos, no se encontró disponible para los suelos de la microcuenca Cuevas, o sus alrededores. Dada esta carencia, se estimaron valores en función de la clasificación del suelo. Perfect et al. (2002), al relacionar los parámetros de retención de agua del modelo Campbell (1974) encontraron relación entre los valores de la dispersitividad y la estructura del suelo; como resultado obtuvieron dispersitividades distintas en función de diferentes texturas, las mismas caracterizadas por diferentes parámetros de retención de agua. Sin embargo, como se indica en su estudio, una de las restricciones para el uso de sus hallazgos es que los valores de dispersitividad son dependientes de la escala a la que se realizan las mediciones, en su caso, sobre columnas de suelo de 6 cm de profundidad.

Vanderborght y Vereecken (2007) ofrecen una recopilación bastante extensa de dispersitividades obtenidas bajo distintas texturas de suelo de diferentes investigaciones realizadas a nivel mundial. Su recopilación abarca también una variedad amplia de distancias de viaje y condiciones de estudio. Basados en esto, y teniendo disponible el contenido de arena, arcilla y limo de cada muestra dentro de la base de datos de IAMGOLD, fue posible relacionar la textura de los horizontes de suelo (Figura 5) con los datos encontrados en la literatura. Hay que considerar que lo que se pretendió fue definir límites en los cuales pudo variar la dispersitividad de cada estrato en la optimización inversa con Hydrus 1D.

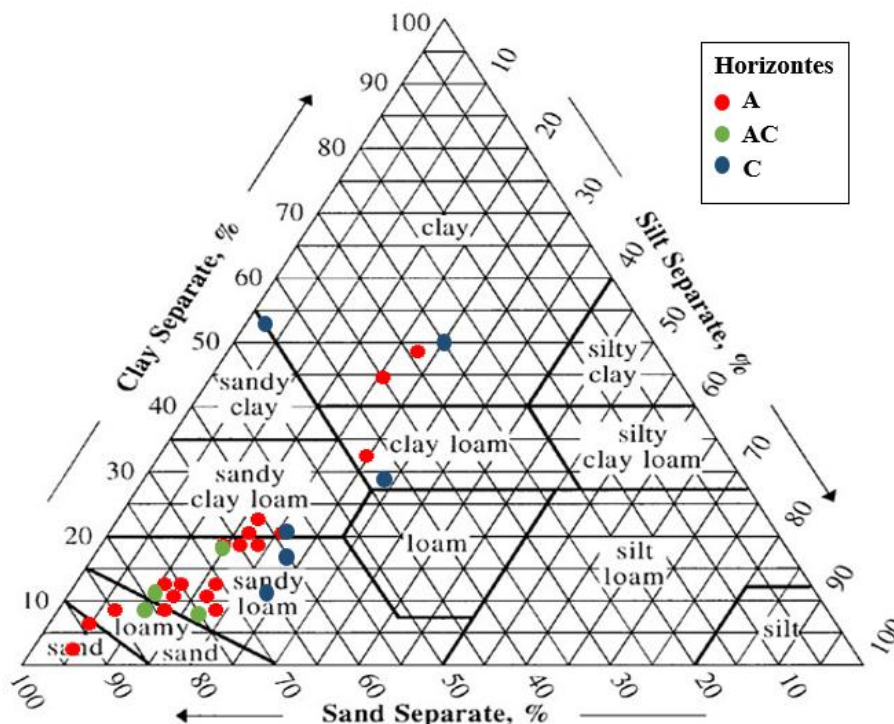


Figura 5: Clasificación de los horizontes según la textura del suelo

Fuente: basado en “Soil Texture Calculator | NRCS Soils,” n.d.

Conociendo entonces la distribución de textura del suelo en cada horizonte, y basándonos en el promedio de la dispersividad de cada textura calculada de la base de Vanderborght y Vereecken (2007) (Tabla 3), se pudo establecer promedios, máximos y mínimos para los horizontes A, AC y C. Se consideró la totalidad de los horizontes para fijar los valores mencionados, los mismos que se detallan en la Tabla 4. Fijar límites de dispersividad mediante el método señalado es ambiguo y los valores deben considerarse únicamente como referencia. Se puede citar además a Jury et al. (1991), según los cuales los valores típicos de dispersividad están entre 0.5 y 2 cm en columnas de suelo en laboratorio, y entre 5 y 20 cm en el campo; Dane et al. (2002) consideran también que la dispersividad puede tomarse como igual a un décimo de la distancia de transporte

Tabla 3: Dispersitividad promedio de cada textura de suelo

Textura	Dispersitividad* (cm)
Marga arcillosa	45.9571
Marga arenosa	3.9271
Marga arcillo arenosa	36.2000
Marga arenosa fina	8.2673
Arena fina	5.7780
Arcilla	13.8111
Arcillo arenosa	11.8000

*Valores promedio de cada textura calculados de la base existente en Vanderborght y Vereecken (2007)

Tabla 4: densidad aparente (ρ) y dispersividad para cada horizonte de suelo

Horizonte		ρ (gr/cm)	Dispersividad (cm)
A	Promedio	0.4293	18.9901
	Mínimo	0.2000	3.9271
	Máximo	0.8625	45.9571
AC	Promedio	0.5458	6.0972
	Mínimo	0.4600	3.9271
	Máximo	0.6230	8.2673
C	Promedio	0.9689	20.3877
	Mínimo	0.7700	3.9271
	Máximo	1.1200	36.2000

3.2.4. Parámetros de modelación del transporte de nitrato en el suelo

Dado que la modelación no considera la toma del nitrato por parte de la plantas, ni se conocen cuáles son los principales procesos de reducción (inmovilización, mineralización y la desnitrificación), se debieron asumir rangos de variación elevados para la constante de decaimiento de primer orden, con el propósito de englobar todos los procesos mencionados, compensando de esta manera su desconocimiento. Por otra parte, el incremento en la concentración del nitrato lixiviado bajo la cobertura de bosque, podría significar que el proceso involucrado en este caso es la nitrificación. Hay que tener presente que la deposición húmeda

de nitrógeno, siendo la lluvia su vehículo, puede ocurrir en forma de amonio y nitrato (Shaffer et al., 2001). En esta investigación se encontró disponible únicamente la concentración de nitrato en la lluvia, por lo cual un balance de nitrógeno quedó descartado, siendo la lixiviación del nitrato el foco de la modelación y posterior análisis.

En el sistema, en la condición de borde superior se consideró la entrada de nitrato presente en la lluvia, la cual es en este caso la principal fuente de nitrógeno al suelo. Se desprecia la volatilización del amonio y su transporte en fase gaseosa. Se asumió que los procesos se realizan en la fase líquida, por lo cual el coeficiente de partición o adsorción isotérmico se considera igual a cero en todos los perfiles.

Para la modelación del transporte de nitrato en el suelo, el coeficiente de difusión molecular en agua se considera igual a $1,64 \text{ cm}^2 \text{ día}^{-1}$ (Wang et al., 2010, Li et al., 2015). La constante de desnitrificación se varió en el rango de 0.01 a 2.5 día^{-1} para páramo y almohadilla, y de 0.001 a 0.02 día^{-1} bajo bosque; esto basado en los valores encontrados en la literatura (Heatwole y McCray, 2007; Wang et al., 2010; Tafteh y Sepaskhah, 2012), la reducción o aumento observados del nitrato bajo cada cobertura, y el desempeño del modelo.

2.3 Modelación

Modelo conceptual

El modelo conceptual sobre el cual se realizó el estudio, consideró la geometría del suelo en una dimensión, es decir, la distribución vertical de cada horizonte en el perfil. Cada una de las treinta calicatas está formada por dos o tres horizontes, los mismos que se especifican en la Tabla 1. A pesar de que cada calicata se encuentra bajo una determinada cobertura vegetal, el análisis se enfocó en la interacción agua-suelo, considerando el efecto de la capa vegetal de manera implícita. Es importante mencionar que añadir estos factores a la modelación la harían de mayor relevancia y así mismo incrementarían su complejidad; queda como trabajo pendiente para futuras investigaciones profundizar más en este sentido. Se excluye además el movimiento lateral del agua en la calicata, esto puede ser asumido dada la baja pendiente que presentan las laderas, enfocándonos únicamente en la lixiviación vertical de agua y nitrato.

La Figura 6 presenta la esquematización del sistema. Se observa la distribución de las calicatas o puntos de monitoreo a lo largo de la toposecuencia de suelo, las mismas que se ubican en la posición topográfica superior, media y baja. Se presenta también el concepto del sistema a modelar, el cual es representado por un perfil de suelo compuesto por los horizontes A, AC y C. Se considera un medio anisótropo, en el cual la conductividad no saturada varía de un horizonte a otro. El agua ingresa al sistema por medio de la lluvia, infiltrándose de manera vertical y atravesando los diferentes horizontes. Así mismo, se considera como única fuente de nitratos al agua de lluvia, pudiendo una vez dentro del suelo ser absorbido por las plantas, unirse a la materia orgánica del suelo (MOS), desnitrificarse y/o ser lixiviado hacia capas más profundas (Shaffer et al., 2001).

Al contar con observaciones de la tensión y concentraciones de nitrato a una profundidad de 50 cm, lo que se buscó fue modelar el flujo de agua y nitratos desde la superficie hacia el interior del perfil del suelo. Para ello fue necesario encontrar parámetros hidrofísicos que se ajusten a las condiciones de la modelación, evaluando los resultados al medir el grado de ajuste de las tensiones y concentraciones simuladas a las observadas.

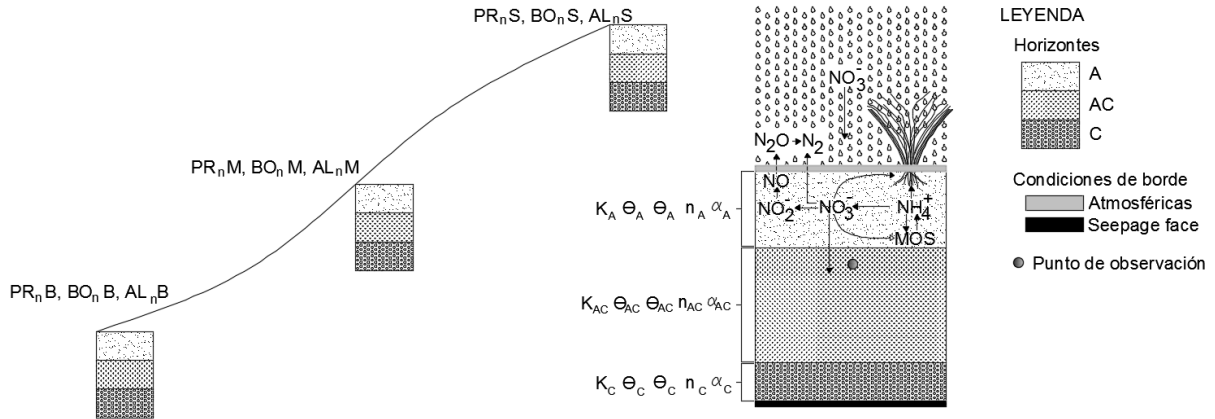


Figura 6: modelo conceptual del del flujo de agua y el transporte de nitrato

Ecuaciones de simulación numérica

A través de los años, se han desarrollado varios modelos computacionales basados en soluciones analíticas y numéricas, con el propósito de cuantificar los procesos físicos y químicos que afectan el flujo de agua y el transporte de contaminantes en la zona vadosa. En las últimas décadas, con un desempeño más elevado, las computadoras han permitido que soluciones numéricas sean más ampliamente usadas en este campo, esto sumado a la creciente disponibilidad de modelos de uso público y comercial. Generalmente, estos enfoques (analítico y numérico) están basados en la ecuación de Richards (1) y la ecuación de convección – dispersión (2), que simulan del flujo de agua y solutos, respectivamente (Šimůnek, 2005).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta R c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta D \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) - q c \right] - \phi \quad (2)$$

En (1), z es la coordenada vertical positiva, t es el tiempo, h es la carga de presión, θ es el contenido de agua, S es un término de lavado que representa el agua tomada por las raíces, y K(h) es la función de la conductividad hidráulica no saturada. En la ecuación (2), c es la concentración de la solución, R el factor de retardo que contabiliza la adsorción, D es el coeficiente de dispersión que considera la difusión molecular y la dispersión hidrodinámica, q

es la densidad el flujo del fluido volumétrica, y \emptyset es un término de lavado/fuente que toma en cuenta varias reacciones de primer y cero órdenes y otras reacciones.

El modelo Hydrus 1D, construido por Simunek et al. (1998) ha sido desarrollado para simular los procesos de flujo y transporte de agua y solutos a través del suelo, además de factores como el calor y las raíces. Hydrus resuelve las ecuaciones (1) y (2), sujetas a condiciones iniciales y de borde, discretizando el perfil del suelo en un número constante de elementos de tamaño variable, aplicando un esquema de elementos finitos a las derivadas espaciales en las ecuaciones diferenciales, y usando aproximaciones de diferencias finitas para las derivadas del tiempo, presentándose así como un modelo computacional razonablemente bien estructurado (Mohanty y Van Genuchten, 1996).

Optimización del modelo

Hydrus incorpora un algoritmo de optimización de parámetros de tipo Marquardt-Levenberg (Marquardt, 1963), que combina los métodos de Newton y el de descenso más empinado (steepest descend), para la estimación inversa de los parámetros hidráulicos del suelo y transporte de solutos (Šimunek et al., 2009). La función objetivo a ser minimizada puede describirse como sigue (Simunek et al., 1998):

$$\begin{aligned} \Phi(b, q, p) = & \sum_{j=1}^{m_q} v_j \sum_{i=1}^{n_{qj}} w_{i,j} [g_j^*(x, t_i) - g_j(x, t_i, b)]^2 \\ & + \sum_{j=1}^{m_p} \bar{v}_j \sum_{i=1}^{n_{pj}} \bar{w}_{i,j} [p_j^*(\theta_i) - p_j(\theta_i, b)]^2 + \sum_{l=1}^{n_b} \hat{v}_l [b_l^* - b_l]^2 \end{aligned} \quad (3)$$

En donde, el primer término de la mano derecha representa las desviaciones entre las variables medidas y las calculadas en tiempo y espacio, como las cargas de presión y concentración; m_q es el número de conjuntos diferentes de mediciones, n_{qj} es el número de mediciones en un conjunto particular, $q_j^*(x, t_i)$ representa las medidas específicas en el tiempo t_i para el j esimo conjunto de medidas en la localización $x(r, z)$, $q_j(x, t_i, b)$ son las predicciones correspondientes del modelo para el vector de parámetros optimizado b , y v_j y w_j son pesos asociados con un conjunto de medidas particular o punto, respectivamente. El segundo término representa diferencias entre propiedades hidráulicas del suelo medidas independientemente. Por último, el termino final representa una función de penalización para las desviaciones ente los parámetros hidráulicos del suelo conocidos p_j^* , y su estimado, b_j , siendo n_b el número de parámetros conocidos a priori y \hat{v}_l los pesos asignados (Šimunek et al., 2009).

Tomando en cuenta la disponibilidad de datos, se empleó toda la serie observada en la optimización de los parámetros físicos del suelo, así como los del transporte del nitrato. Esto, dado que la serie observada de tensiones en el suelo no supera los dieciocho valores y, además que, no se cuenta con un periodo mayor a un año hidrológico, lo que evita la incorporación de la estacionalidad en el proceso de calibración y validación; lo mismo ocurre con las

observaciones químicas. Hay que considerar además el período de calentamiento del modelo, el mismo que abarcó las primeras observaciones, correspondientes al periodo octubre-diciembre de 2012. Una vez que se alcanzó resultados satisfactorios ajustando las variables físicas del suelo, se procedió a optimizar los parámetros de transporte de nitrato.

Dada la disponibilidad de parámetros del suelo, se empleó en Hydrus 1D el modelo de (Van Genuchten, 1980), cuya ecuación relaciona los contenidos de agua residual y de saturación con variables empíricas, para estimar la conductividad hidráulica no saturada. Se eligió además considerando que este es uno de los modelos físicamente basados más empleados en las curvas de retención de agua (W. Buytaert et al., 2005).

Las condiciones de borde superior de la calicata fueron las atmosféricas, pudiendo ingresar en el modelo las variables de precipitación, además de la humedad relativa, la temperatura, velocidad del viento y radiación solar. Adicionalmente se eligió el método de estimación de la evapotranspiración potencial de referencia (ET_o) de la FAO, Penman Monteith (Allen et al., 1998). Por otro lado, las condiciones del borde inferior se consideraron como “seepage face” o límite de filtración, que puede entenderse como el límite entre la zona saturada y la atmosférica; por la profundidad del horizonte C no se puede considerar un nivel de la tabla de agua específico, y asumir una condición de flujo libre omitiría la acumulación de agua en los estratos inferiores.

Evaluación del desempeño del modelo

El desempeño del modelo se evaluó mediante el uso del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el radio de la desviación estándar de las observaciones de la raíz del error medio cuadrático (RSR), el índice de error del porcentaje de sesgo (PBIAS) y el error medio cuadrático (RMSE).

NSE determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos observados, indicando la bondad de ajuste de los datos simulados y observados frente a una línea 1:1 (Nash y Sutcliffe, 1970). Su cálculo se realiza mediante la ecuación:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad (4)$$

En donde, Y_i^{obs} representa al valor observado, Y_i^{sim} el simulado y, Y^{mean} la media de los valores observados, y n el número total de observaciones.

El rango de NSE puede variar desde $-\infty$ a 1, siendo considerado el rango 0-1 aceptable, mientras que valores inferiores a 0 indican que la media observada es mejor que el valor simulado, señalando que el modelo tiene un desempeño pobre. RSR, representada por la ecuación (5), estandariza la raíz del error medio cuadrático usando la desviación estándar de las observaciones; un valor de 0 indica un ajuste óptimo. PBIAS, ecuación (6), mide la tendencia promedio de los datos simulados para ser mayores o menores que los observados; Un valor de

0 indica precisión del modelo, valores positivos subestimación y negativos sobreestimación. Por último, valores bajos de RMSE son considerados de mejor desempeño (Moriassi et al., 2007).

$$RSR = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2}} \right] \quad (5)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \quad (7)$$

Tabla 5: Clasificación general del desempeño de NSE, PBIAS y RSR, para un desempeño mensual (Moriassi et al., 2007)

Desempeño	NSE	RSR	PBBIAS	
			Flujo de agua	N, P
Muy bueno	$0.75 < NSE < 1.00$	$0.00 < RSR < 0.50$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 25$
Bueno	$0.65 < NSE < 0.75$	$0.50 < RSR < 0.60$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$	$\pm 25 < PBIAS < \pm 40$
Satisfactorio	$0.50 < NSE < 0.65$	$0.60 < RSR < 0.70$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$	$\pm 40 < PBIAS < \pm 70$
Insatisfactorio	$NSE < 0.50$	$RSR > 0.70$	$PBIAS > \pm 25$	$PBIAS > \pm 70$

3 RESULTADOS

En primera instancia se analiza los resultados de las tensiones medidas, así como las concentraciones de nitrato en la solución del suelo, en cada punto de monitoreo y dentro del periodo de estudio. Se evaluaron los ajustes alcanzados en la optimización inversa de los flujos de agua y nitrato en los treinta puntos de monitoreo. En base al ajuste, se obtuvieron parámetros de flujo de agua y transporte de nitrato promedios por horizonte de suelo y tipo de cobertura. Con el objetivo de tener un solo valor por perfil de suelo para los análisis posteriores se promediaron los valores de flujo de agua y las concentraciones de nitrato en los diferentes horizontes. Posteriormente, y con el fin de simplificar el análisis, se promediaron los flujos por tipo de cobertura vegetal y por la posición topográfica en la ladera (alta, media y baja). Los resultados alcanzados se detallan a continuación.

3.1 Observaciones de tensión y concentración de nitrato monitoreadas en el periodo de estudio.

La distribución temporal de las tensiones monitoreadas en cada punto de observación, a 50 cm de profundidad, se presentan en la Figura 7, mientras que las variaciones de tensión en cada punto se pueden apreciar en la Figura 8. Como se mencionó anteriormente, el monitoreo se extiende desde el mes de noviembre de 2012 hasta septiembre de 2013. Durante el monitoreo se registraron un máximo de 18 y un mínimo de 15 tensiones por punto. El rango de variación de las tensiones va desde -1 kPa hasta los -350 kPa.

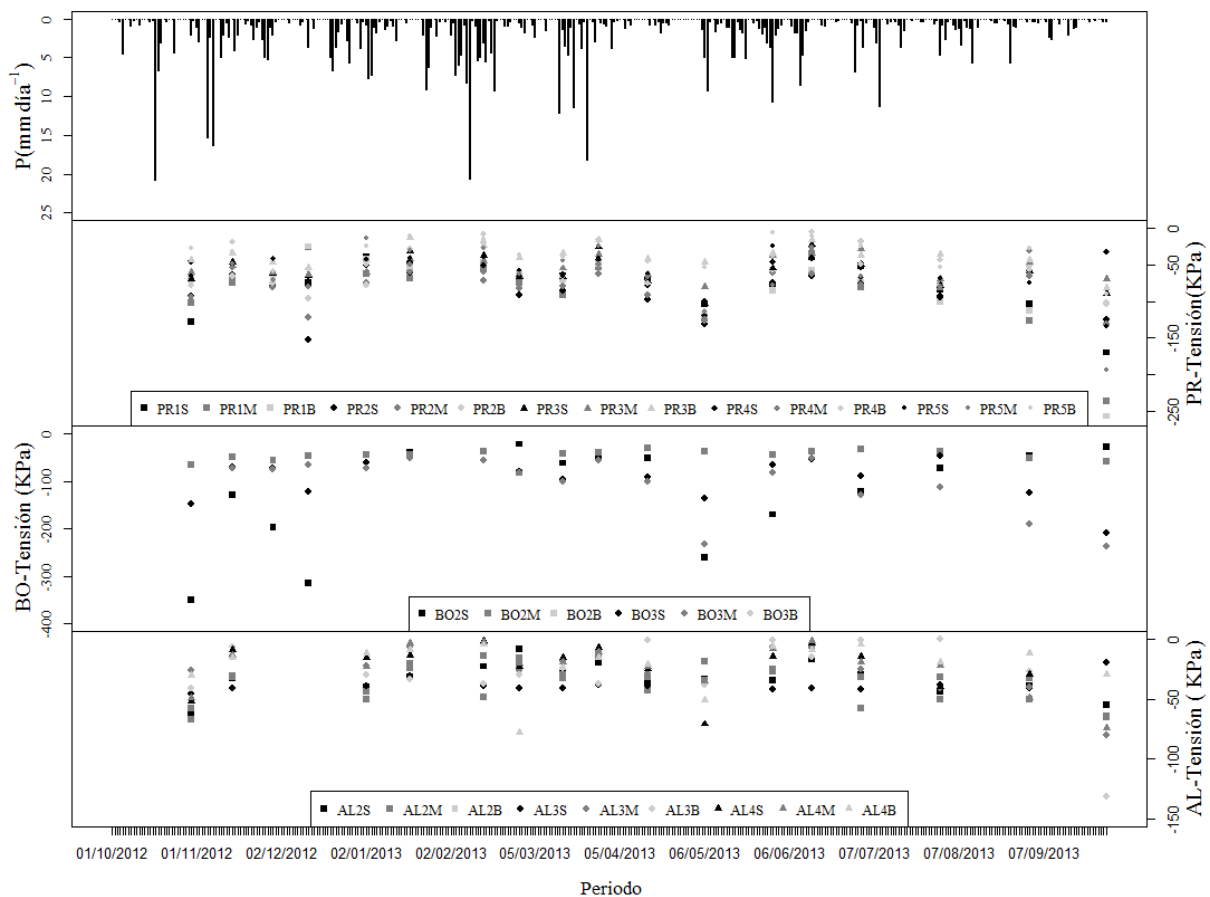


Figura 7: tensiones monitoreadas en las calicatas durante el periodo de estudio

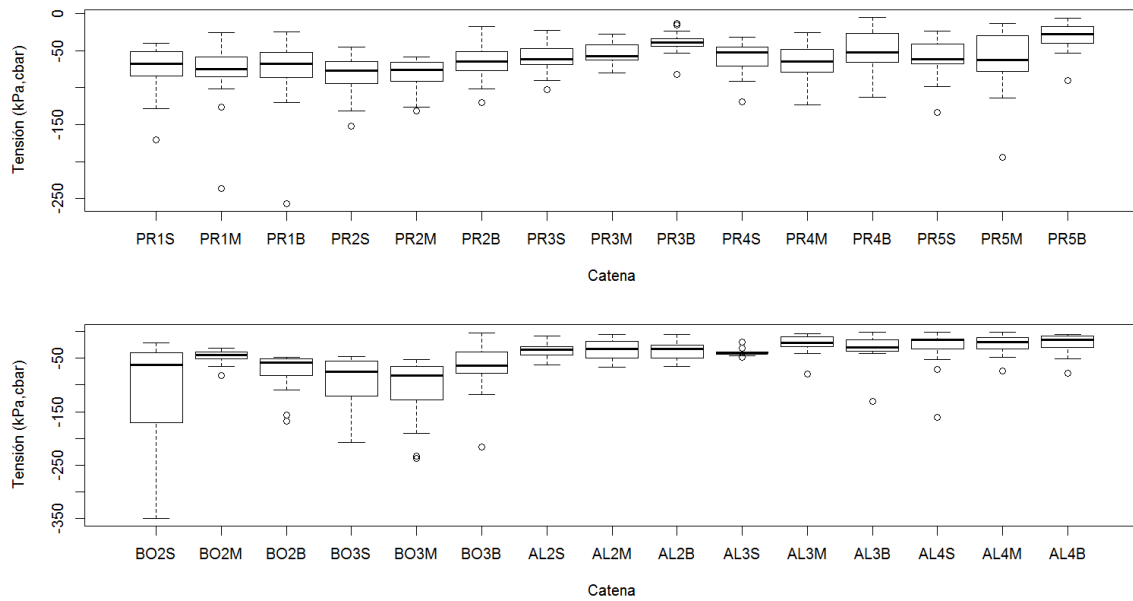


Figura 8: distribución de las tensiones monitoreadas en cada punto de monitoreo

La distribución de concentraciones de nitrato de las muestras analizadas, así como del agua de lluvia, y su distribución temporal se presentan en la Figura 9 y Figura 10, respectivamente. En la Figura 9 no se incluyen las concentraciones observadas en los puntos BO3S, BO2S y BO3M dado que sus valores son elevados, de hasta 7 mgL^{-1} , en comparación con la analizada en los demás puntos; el rango de variación en los demás puntos llega hasta un máximo de 0.4 mgL^{-1} . Dado que se disponía de un número limitado de concentración del ion en la lluvia, se trabajó con el promedio mensual y distribuido a escala diaria.

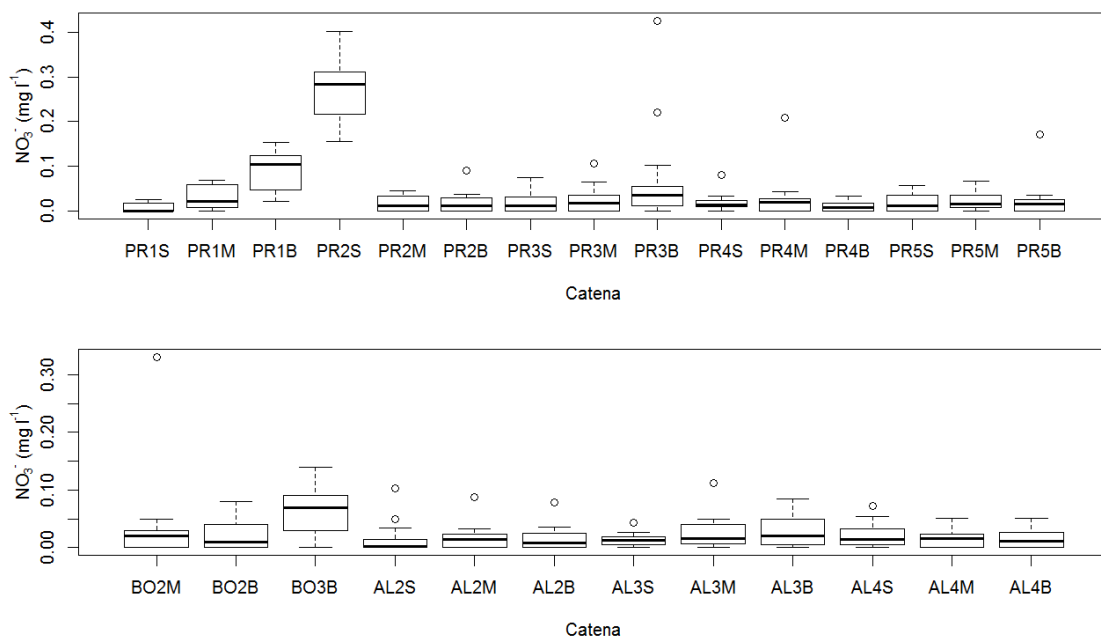


Figura 9: distribución de la concentración de nitrato en cada punto de monitoreo

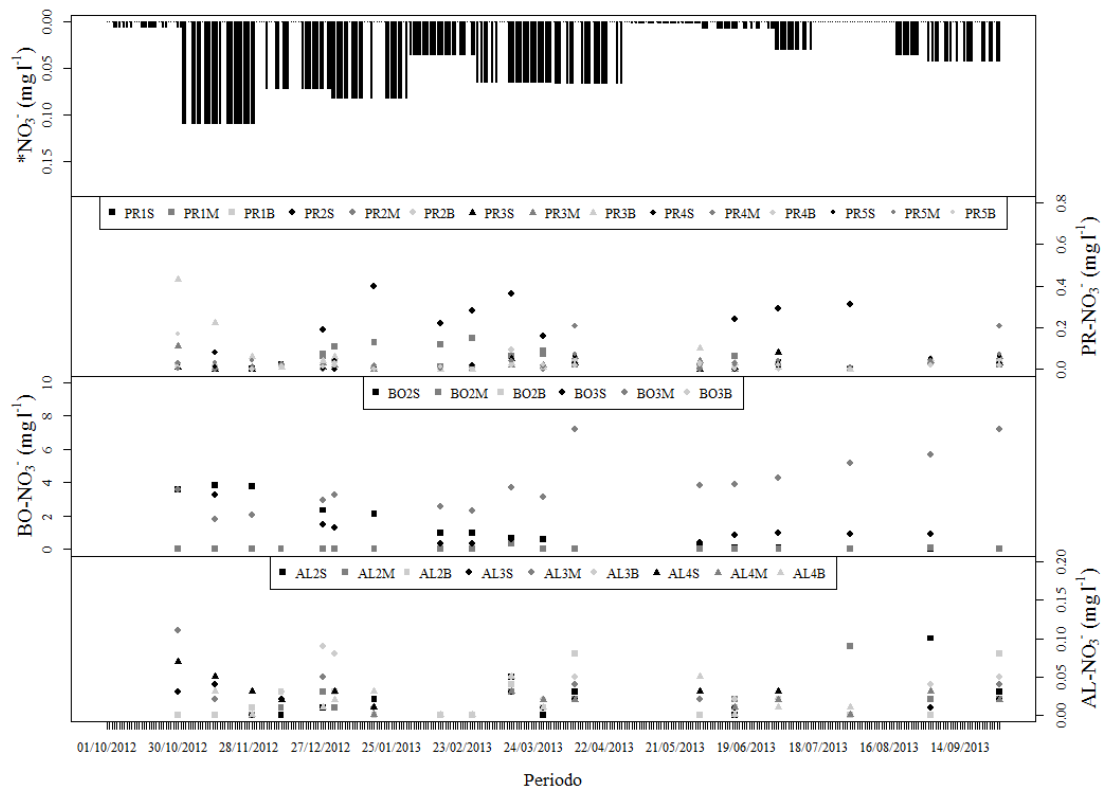


Figura 10: concentración de nitratos en las muestras de la solución del suelo analizadas
***Corresponde a la concentración de nitrato en el agua de lluvia**

Los procesos que sigue el nitrógeno en el suelo estudiado pueden asumirse al observar la Figura 10. Se puede observar que bajo las coberturas de páramo y almohadilla el nitrato es en mayor parte reducido. Por otro lado, bajo la cobertura de bosque existe un claro incremento de concentración del nitrato. La reducción, en el primer caso, podría deberse a procesos de mineralización, inmovilización, desnitrificación y/o aprovechamiento vegetal (Li et al., 2015b). Puede asumirse que el aporte de nitrato a la lixiviación observada bajo bosque, se debe a la interacción del agua de lluvia con el follaje antes de entrar al suelo, y además, a la descomposición de mayor cantidad de biomasa en el sistema.

3.2 Evaluación del ajuste alcanzado en la modelación de las tensiones y concentración de nitrato

Las Figura 12 y 13 presentan el ajuste alcanzado mediante la modelación inversa de la tensión en el suelo en cada punto de observación. Se puede apreciar un mejor comportamiento del modelo en las simulaciones que corresponde a la cobertura de pajonal (PR1-PR5), mientras que las simulaciones bajo la cobertura de almohadillas (AL) muestran un desempeño desfavorable; se observa que el modelo toma un lapso aproximado de tres puntos para ajustarse a la serie observada. Por lo expresado se consideró prudente evaluar el desempeño del modelo excluyendo a las primeras observaciones de la serie; los rangos de variación del desempeño alcanzado se pueden apreciar en la Figura 11.

De manera similar, la Figura 14 y Figura 15 presentan el ajuste grafico que se alcanzó en la simulación de la concentración del nitrato. Dado que para los puntos AL4S, AL4M y AL4B no se obtuvo un desempeño aceptable en cuanto a tensión bajo ningún coeficiente de evaluación, quedaron fuera de la modelación de nitrato. Así, de los 27 puntos simulados, 13 tuvieron un desempeño muy bueno según PBIAS, siendo de estos BO2S el único en alcanzar esta calificación además en NSE y RSR; 13 puntos alcanzaron un desempeño bueno. De igual manera, los rangos de variación de los coeficientes de evaluación de ajuste en la modelación de nitrato se pueden apreciar en la Figura 11.

La Tabla 6 detalla los valores alcanzados por los coeficientes NSE, RSME, RSR y PBIAS, tanto en el ajuste de tensión como el de nitrato. En cuanto al primero, no se alcanzaron resultados satisfactorios para la mayoría de las tensiones en cada punto de observación, solo en 8 de los 30 se obtuvieron índices superiores a cero, siendo los más elevados igualases a 0.55 y 0.66, para el punto PR1B y BO3M, respectivamente. No se alcanzaron resultados aceptables de RSR, y se presentan valores elevados de RSME. Según PBIAS, basados en los rangos de desempeño antes presentados, la mayoría de las simulaciones caen dentro del rango de desempeño satisfactorio, siendo las únicas desfavorables, como ya se indicó, AL4S, AL4M y AL4B.

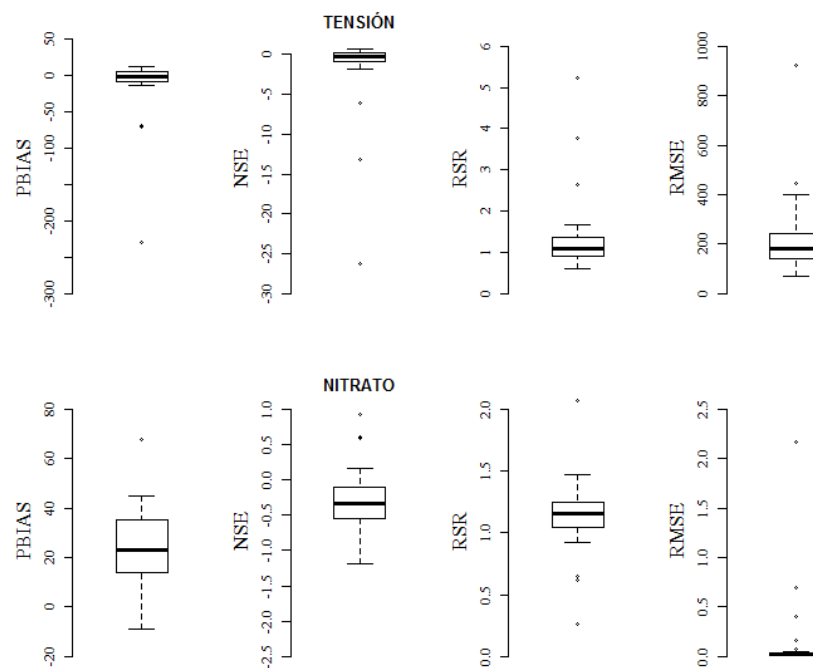


Figura 11: distribución del desempeño alcanzado mediante modelación inversa

Considerando PBIAS, es la cobertura de bosque la que en promedio presenta un mejor ajuste en cuanto a la modelación de tensión y concentración de nitrato en el suelo. Dentro de la Tabla 6 se detallan además los valores alcanzados en la evaluación del ajuste en la simulación de la concentración de nitrato.

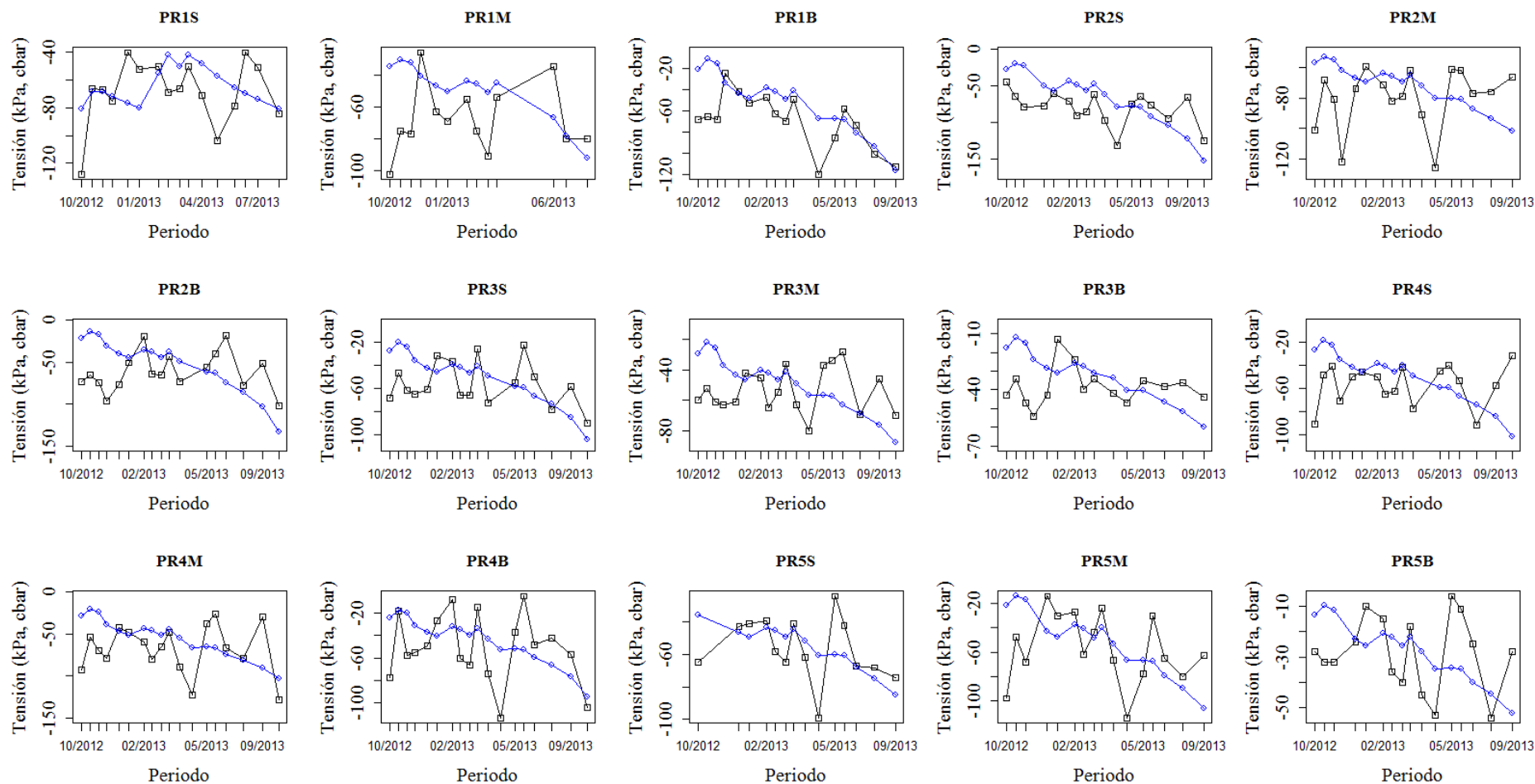


Figura 12: Ajuste de la tensión en el suelo simulada (línea azul) mediante modelación inversa a la observada (línea negra) a una profundidad de 50 cm en las catenas bajo cobertura de páramo

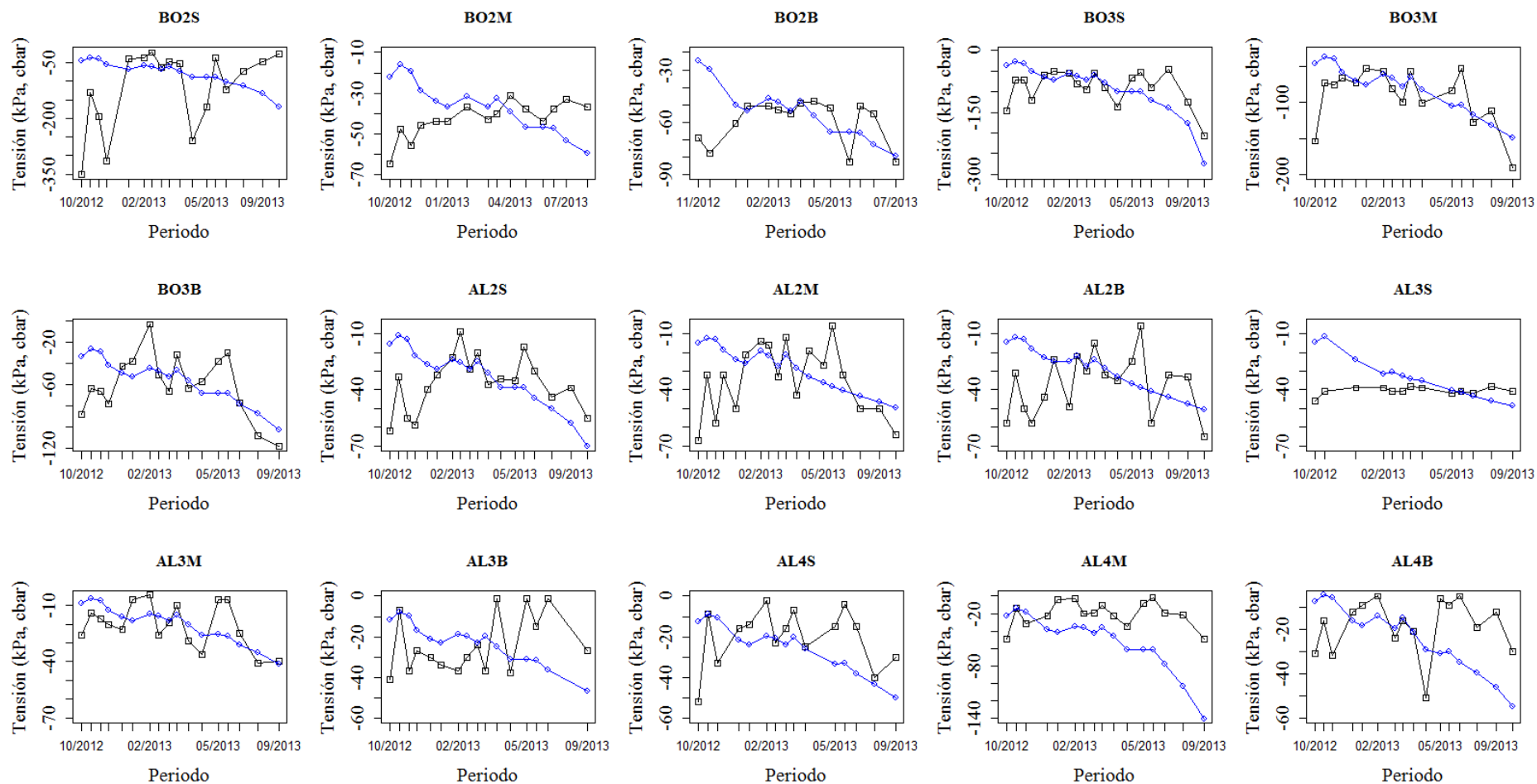


Figura 13: Ajuste de la tensión en el suelo simulada (línea azul) mediante modelación inversa a la observada (línea negra) a una profundidad de 50 cm en las catenas bajo las coberturas de bosque y almohadilla

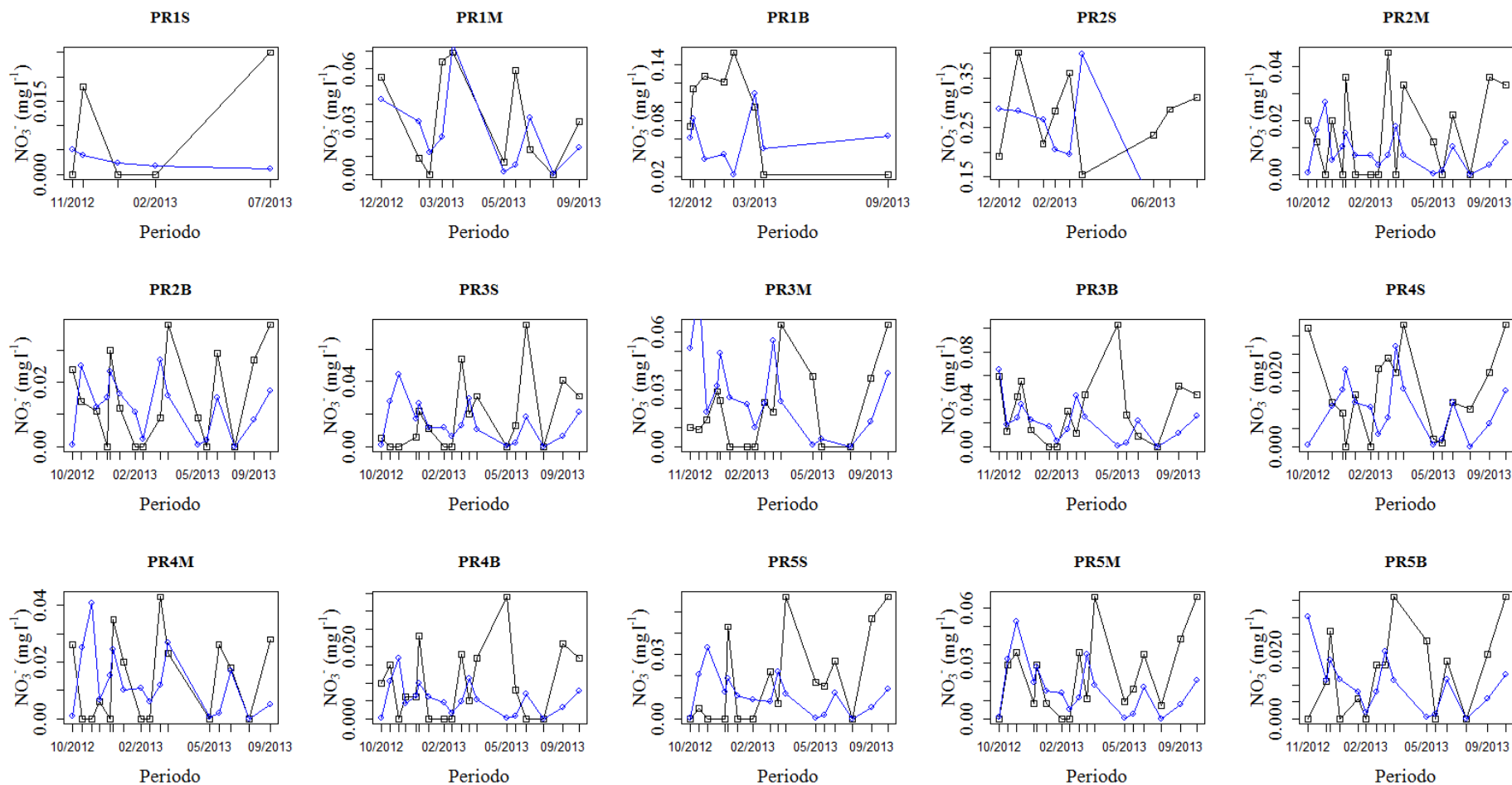


Figura 14: Ajuste de concentración de nitrato en el suelo simulada (línea azul) mediante modelación inversa a la observada (línea negra) a una profundidad de 50 cm en las catenas bajo cobertura de páramo

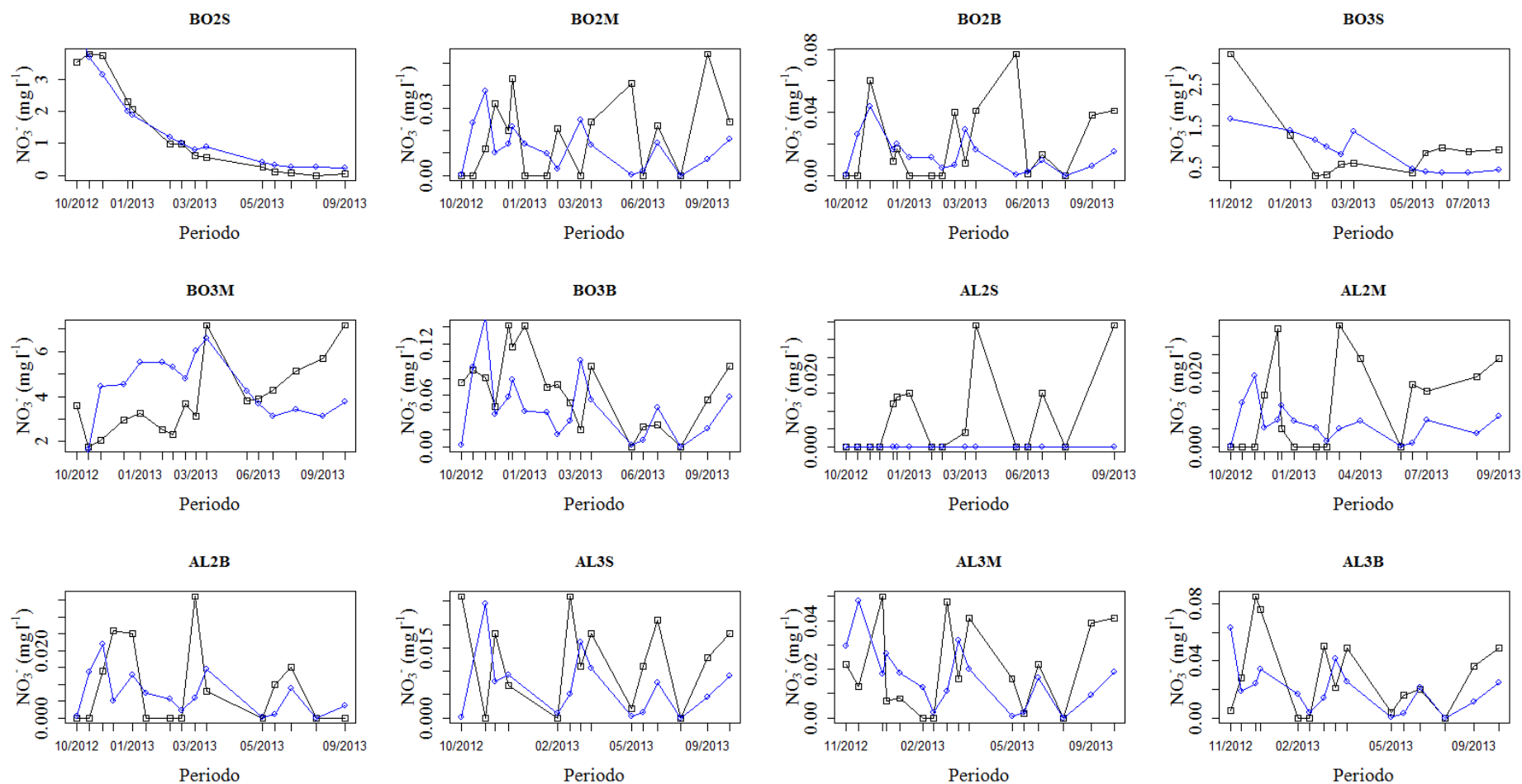


Figura 15: Ajuste de concentración de nitrato en el suelo simulada (línea azul) mediante modelación inversa a la observada (línea negra) a una profundidad de 50 cm en las catenas bajo cobertura de bosque y almohadilla

Tabla 6: evaluación del ajuste del modelo en la simulación de tensiones y nitrato en los puntos de monitoreo

Catena	Tensión				Nitrato			
	NSE	PBIAS	RSR	RMSE (Kpa)	NSE	PBIAS	RSR	RMSE (mgL ⁻¹)
PR1S	-0.68	1.80	1.30	21.80	-0.41	75.57	1.19	0.01
PR1M	-0.22	10.78	1.10	18.97	0.25	14.54	0.87	0.02
PR1B	0.55	12.11	0.67	16.64	-0.64	19.91	1.28	0.06
PR2S	-1.02	9.13	1.42	27.34	-2.19	19.68	1.78	0.13
PR2M	-0.57	4.63	1.25	23.09	-0.21	26.73	1.07	0.02
PR2B	-0.87	-1.14	1.37	29.89	0.24	7.84	0.87	0.01
PR3S	-0.07	-1.38	1.03	18.19	0.06	-2.38	0.98	0.02
PR3M	-0.68	-2.18	1.30	17.93	-0.10	42.82	1.05	0.02
PR3B	-0.85	2.13	1.36	12.50	-0.32	26.97	1.15	0.03
PR4S	-1.83	-0.02	1.68	24.00	0.18	16.87	0.90	0.01
PR4M	-0.10	7.72	1.05	28.47	-0.05	44.96	1.03	0.02
PR4B	0.16	1.88	0.92	25.23	-0.37	47.18	1.14	0.01
PR5S	0.16	-2.02	0.92	16.75	-0.13	51.23	1.06	0.02
PR5M	0.17	-12.71	0.91	22.51	0.06	7.24	0.97	0.02
PR5B	-0.13	-11.81	1.06	14.99	0.07	8.16	0.96	0.01
AL2S	-0.30	-9.33	1.14	13.45	0.18	36.56	0.90	0.01
AL2M	0.28	-1.05	0.85	12.79	-0.44	40.51	1.20	0.01
AL2B	-0.23	8.57	1.11	16.32	-0.02	20.66	1.01	0.01
AL3S	-26.21	7.81	5.22	6.93	-0.25	47.61	1.12	0.01
AL3M	0.32	-7.33	0.83	9.19	-0.30	19.32	1.14	0.02
AL3B	-0.89	-14.04	1.37	16.77	0.16	34.49	0.92	0.02
AL4S	-1.15	-71.27	1.47	13.71	-	-	-	-
AL4M	-13.13	-228.94	3.76	43.54	-	-	-	-
AL4B	-1.46	-68.89	1.57	17.44	-	-	-	-
BO2S	-0.27	6.85	1.13	90.63	0.94	-2.70	0.25	0.32
BO2M	-6.05	-4.26	2.66	10.77	-0.41	33.71	1.18	0.02
BO2B	0.22	-2.16	0.88	9.61	-0.09	26.27	1.05	0.02
BO3S	-0.02	-14.21	1.01	39.12	-1.02	-8.48	1.42	0.54
BO3M	0.61	-0.78	0.62	21.17	-0.72	9.45	1.31	2.16
BO3B	0.45	-7.53	0.74	20.20	0.17	9.99	0.91	0.04

3.3 Parámetros hidrofísicos y de transporte optimizados por el modelo

Realizada la evaluación del desempeño, se analizaron los parámetros hidrofísicos optimizados por Hydrus 1D. Con el fin de simplificar el análisis se obtuvieron promedios por cobertura y horizonte de suelo. La distribución de los parámetros: contenido de agua en saturación y residual, y la conductividad satura por horizonte de suelo y cobertura, se pueden apreciar en la Figura 16 y Figura 17. Se puede observar que el contenido de saturación de agua (θ_s) es superior en los horizontes A bajo las coberturas de páramo y bosque, y disminuye en los estratos inferiores; no ocurre lo mismo bajo la cobertura de almohadilla, donde el horizonte AC es el que presenta un valor de θ_s superior; la conductividad hidráulica saturada presenta un comportamiento similar al que tiene θ_s . Es notable también, que el contenido de agua residual (θ_r) de los horizontes AC y C, bajo bosque, sean casi tres veces mayores que sus homólogos

bajo las otras coberturas. Los promedios por cobertura y horizonte de suelo se detallan en la Tabla 7.

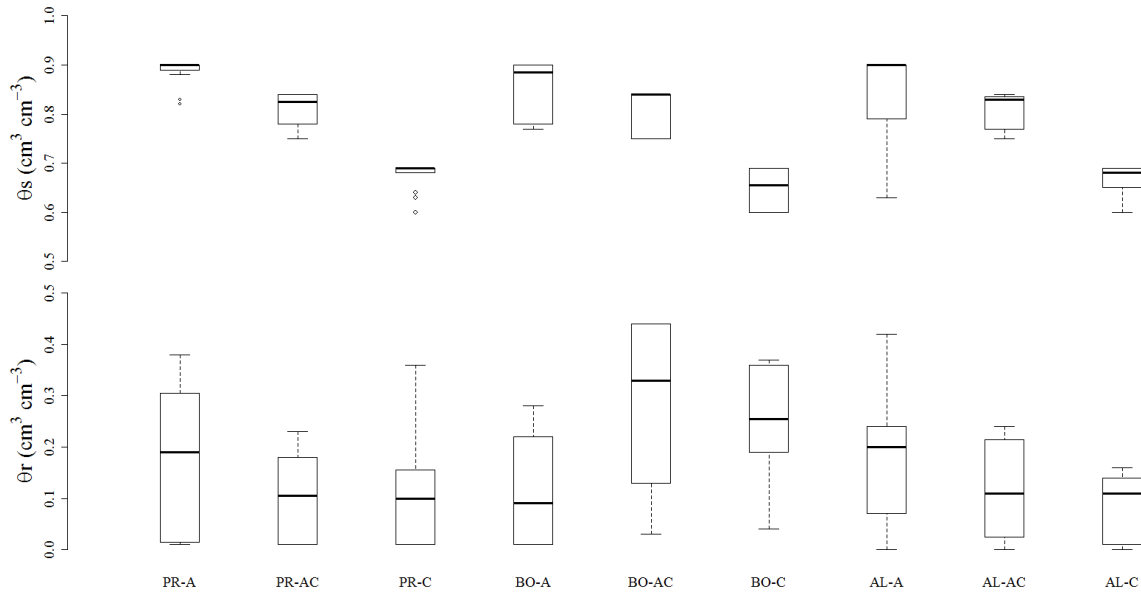


Figura 16: distribución del contenido de saturación de agua (θ_s) y de agua residual (θ_r) optimizado bajo cada cobertura y estrato de suelo

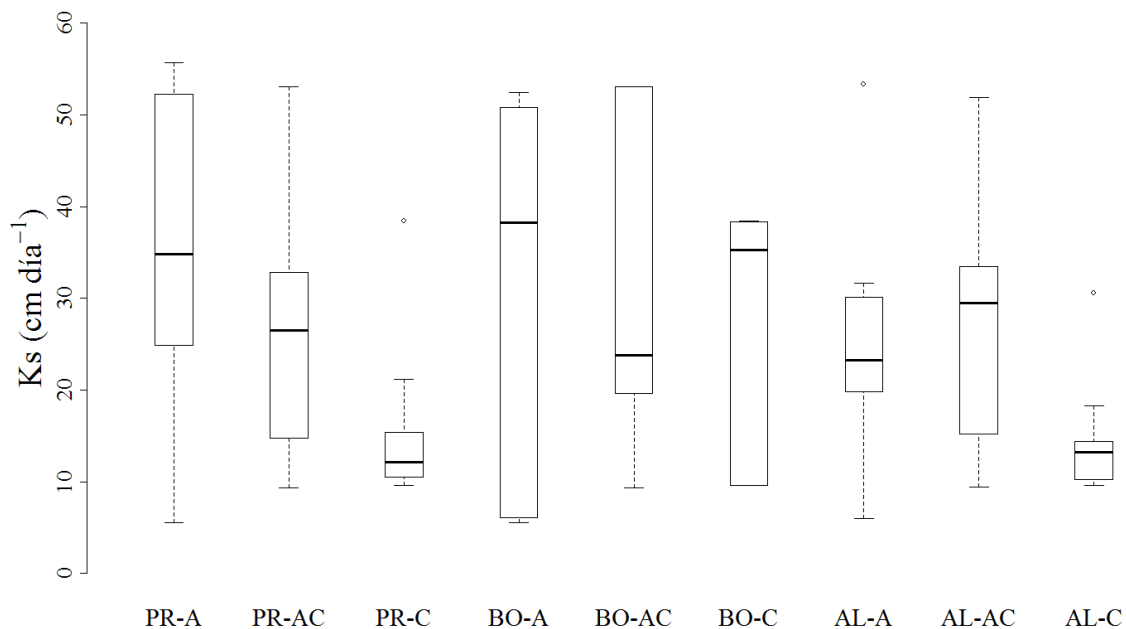


Figura 17: distribución de la conductividad saturada optimizada por tipo de cobertura y horizonte

Tabla 7: Parámetros hidrofísicos promedios del suelo referentes al modelo de (Van Genuchten, 1980)

Cobertura	Horizonte	θ_r	θ_s	α	n	K_s (cm día ⁻¹)	m
PR	A	0.17	0.89	0.001	3.25	36.41	0.69
	AC	0.10	0.80	0.001	1.89	26.54	0.47
	C	0.10	0.68	0.005	1.57	12.64	0.36
BO	A	0.11	0.85	0.001	3.25	31.89	0.69
	AC	0.27	0.80	0.001	1.70	31.80	0.41
	C	0.24	0.64	0.017	1.53	27.75	0.35
AL	A	0.24	0.76	0.001	2.34	23.29	0.57
	AC	0.16	0.79	0.002	1.80	35.02	0.44
	C	0.06	0.64	0.014	1.94	16.05	0.48

Haciendo uso de los parámetros promedios de suelo (Tabla 7) se calcularon y graficaron las curvas pF, o de retención de humedad, para cada horizonte bajo las tres coberturas establecidas. Las curvas se muestran en la Figura 18. Se observa similitud en las curvas de estratos homólogos, lo cual puede ser explicado dado que el único tipo de suelo considerado en el análisis es el Andosol. La diferencia más notable la presenta la curva bajo bosque en los horizontes AC y C, en las cuales el contenido de agua en punto de marchites es hasta dos veces superior al alcanzado bajo las otras coberturas.

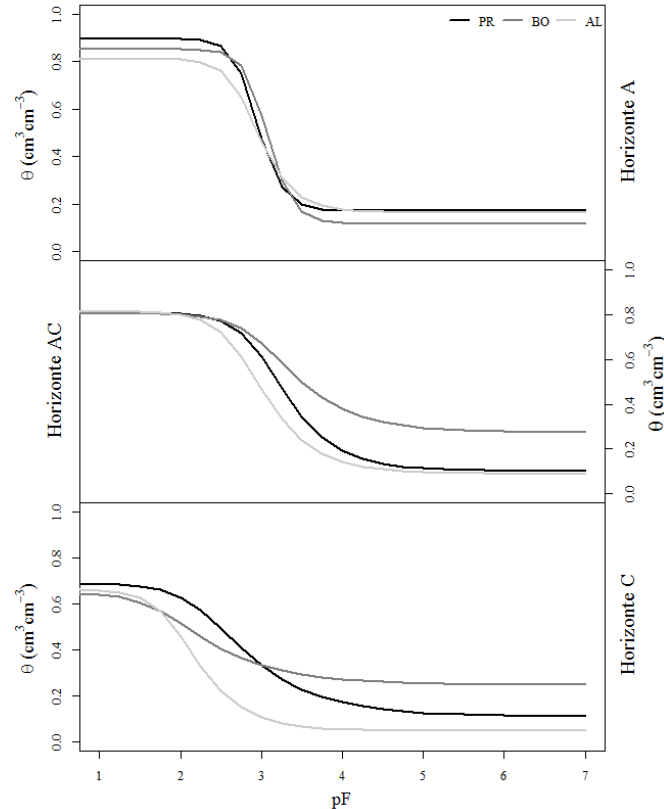


Figura 18: curvas pF de los horizontes A, AC y C bajo las coberturas de páramo, almohadilla y bosque

La distribución de los parámetros de densidad aparente, dispersividad lineal y tasa de decaimiento de primer orden se observan en las Figura 19, Figura 20, y Figura 21, respectivamente. La densidad aparente varia en un rango entre 0.2 y 0.85 g cm⁻³, estando las medianas más cerca del límite inferior. La dispersividad por otro lado, no es mayor a 50 cm, presentando la mediana mayor variabilidad entre uno y otro horizonte y cobertura. Las tasas de decaimiento bajo la cobertura de páramo presenta medias relativamente superiores a las alcanzadas bajo las demás coberturas, en especial en el horizonte C; las dispersividades bajo bosque en su mayoría se mantienen cercanas al mínimo de 0.001 día⁻¹.

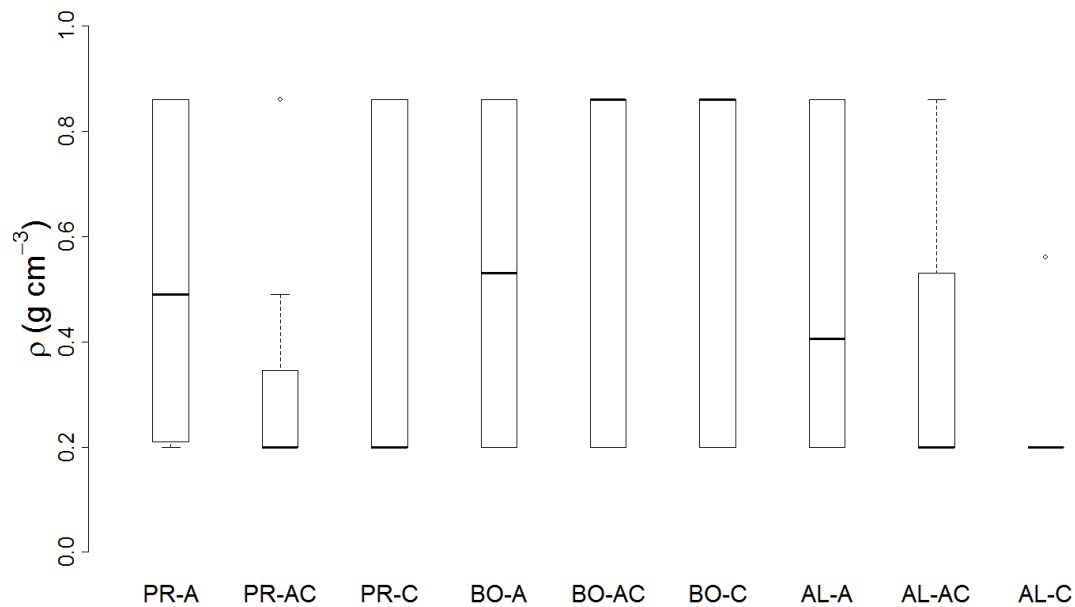


Figura 19: distribución de la densidad aparente del suelo según la cobertura y horizonte

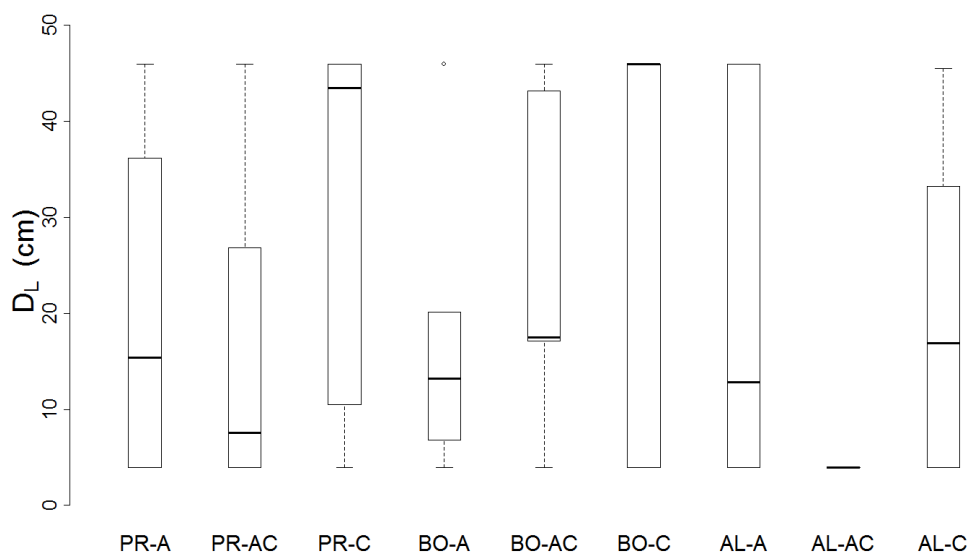


Figura 20: distribución de la dispersividad longitudinal en cada horizonte de suelo bajo las distintas coberturas

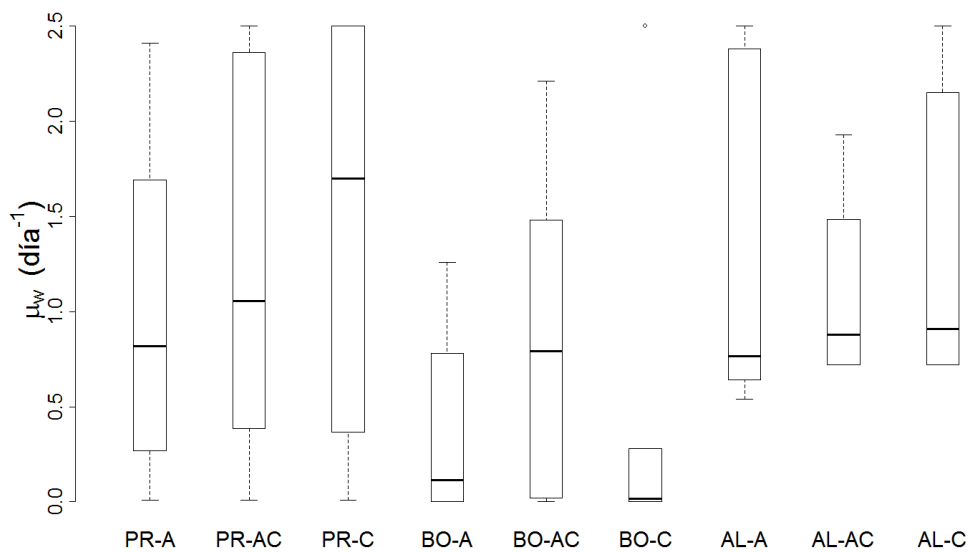


Figura 21: distribución de las tasas de decaimiento de primer orden optimizadas bajo cada cobertura y horizonte

Los parámetros promedio de transporte de nitrato se exponen en la Tabla 8, en la cual se presentan promedios por horizonte de suelo y cobertura. La densidad aparente optimizada por el modelo es inferior a la unidad, pudiendo ser de hasta 0.64 g cm^{-3} ; la mayor densidad la presenta el horizonte C bajo bosque. La dispersitividad es inferior en el horizonte AC, en comparación con el A y C, bajo las tres coberturas; por otro lado, los valores de dispersitividad más elevados se presenta en los horizontes C, siendo superiores a 26 cm. Por último, las tasa de decaimiento de primer orden en los horizontes de suelo de bosque son hasta tres veces inferiores que en los horizontes bajo páramo y almohadilla, pudiendo llegar a ser tan bajos como 0.38 día^{-1} .

Tabla 8: densidad aparente (ρ), dispersividad longitudinal (D_L), y constante de decaimiento de primer orden (μ_w) bajo cada cobertura y horizonte de suelo

Cobertura	Horizonte	$\rho \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$	$D_L \text{ (cm)}$	$\mu_w \text{ (día}^{-1}\text{)}$
PR	A	0.56	18.03	1.08
	AC	0.33	15.56	1.24
	C	0.48	30.65	1.54
BO	A	0.53	17.22	0.38
	AC	0.60	25.51	0.90
	C	0.64	31.95	0.47
AL	A	0.49	20.90	1.26
	AC	0.37	3.93	1.10
	C	0.27	14.95	1.08

3.4 Flujos de agua diarios y acumulados durante el periodo de estudio

La Figura 22 presenta los resultados de simulación por cobertura de suelo. Se puede observar que las curvas de infiltración, evaporación y almacenamiento no presentan diferencias notables

y siguen patrones muy similares. En el primer caso, bajo las tres coberturas, los picos de infiltración ocurren paralelamente con los picos de precipitación, siendo los máximos iguales a 11.00, 9.37 y 8.17 mm día⁻¹ bajo almohadilla, páramo y bosque, respectivamente, ocurridos en el mes de octubre. En el caso de la evaporación potencial, se presentan máximos de 1.88, 1.75 y 1.59 mm día⁻¹ para almohadilla, bosque y páramo, respectivamente; ocurriendo en periodos secos, como el mes de diciembre de 2012. Que la almohadilla presente una evaporación más elevada que bosque, pueden explicarse por el hecho de no incorporar a la modelación parámetros morfológicos de cada vegetación. Se presentan valores bajos de escorrentía en todo el intervalo de tiempo, siendo los máximos de 0.0056, 0.0037 y 0.0028 mm día⁻¹ bajo bosque, páramo y almohadilla, respectivamente. El almacenamiento se ha calculado como la diferencia entre la precipitación y la sumatoria de la infiltración, evaporación potencial y la escorrentía, considerando un balance de masa; en el gráfico, se presentan periodos negativos de almacenamiento, sin embargo, estos deben ser considerados como un agotamiento del mismo durante periodos secos, volviendo a recargarse en eventos de lluvia. La infiltración y almacenamiento presentan una correlación directa con la precipitación, siendo esta mayor a 0.9 para todas las coberturas; la evaporación por otro lado, presenta una correlación negativa menor a -0.5, y finalmente, la escorrentía no presenta correlación con la precipitación dado que esta no supera los 0.25 y puede ser considerada insignificante en el sistema.

La Figura 23 muestra la acumulación de las variables simuladas y la calculada (S, almacenamiento), pudiendo observarse la diferencia entre una cobertura y otra. La infiltración demuestra ser mayor en suelos bajo almohadilla y menor en bosque, pudiendo notarse el mismo patrón para la evaporación potencial. Lo contrario sucede con la escorrentía y el almacenamiento, en donde es el bosque el que presenta valores superiores; la escorrentía es dos veces mayor en bosque que en almohadilla. Los descensos en la curva acumulada del almacenamiento evidencian el agotamiento periódico en el suelo. Los resultados en los gráficos pueden ser interpretados observando la Tabla 9, la cual detalla el valor acumulado alcanzado al final del período por las variables bajo las distintas coberturas.

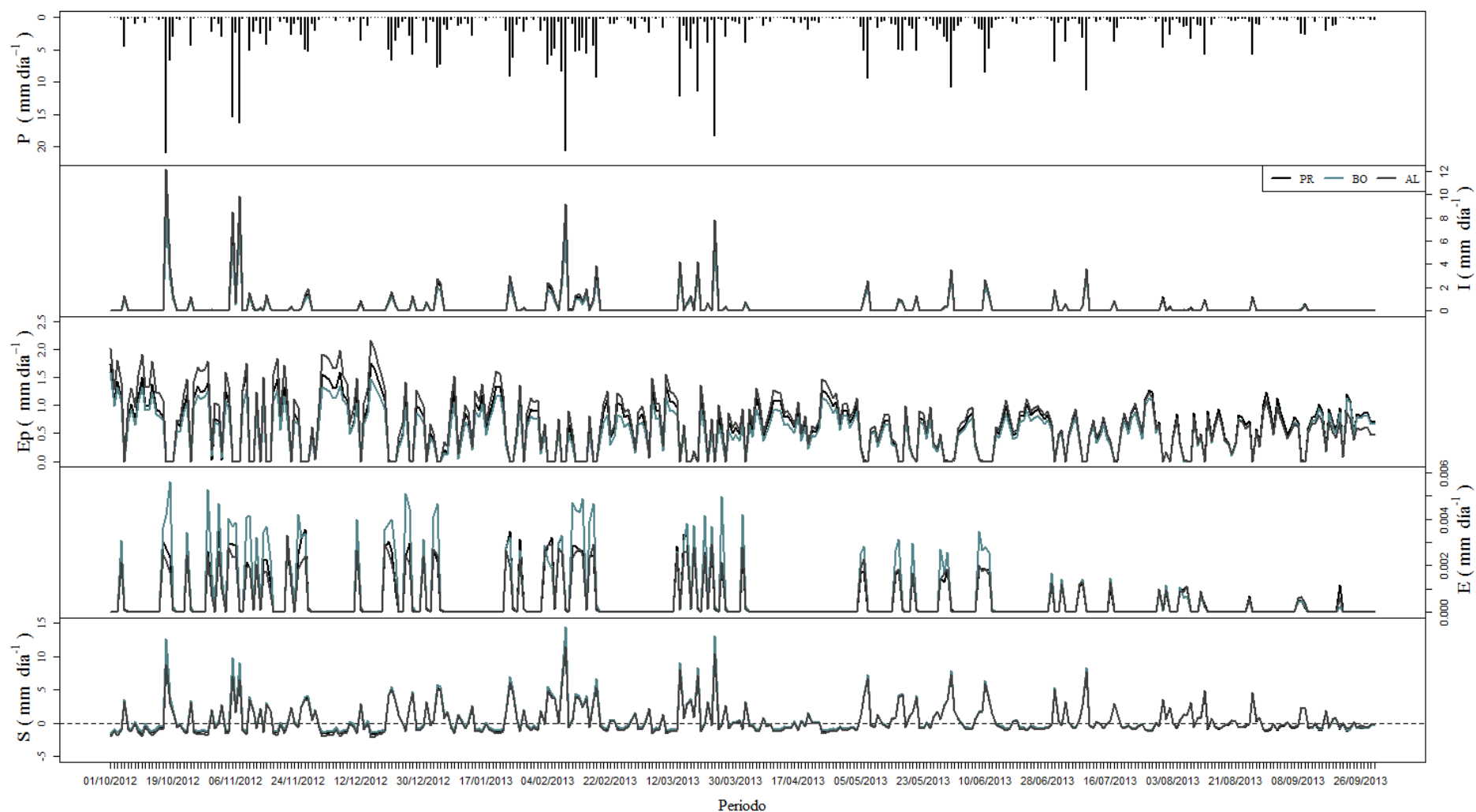


Figura 22: infiltración (I), evaporación potencial (Ep), escorrentía (E) y Almacenamiento (S) simuladas por cobertura de suelo

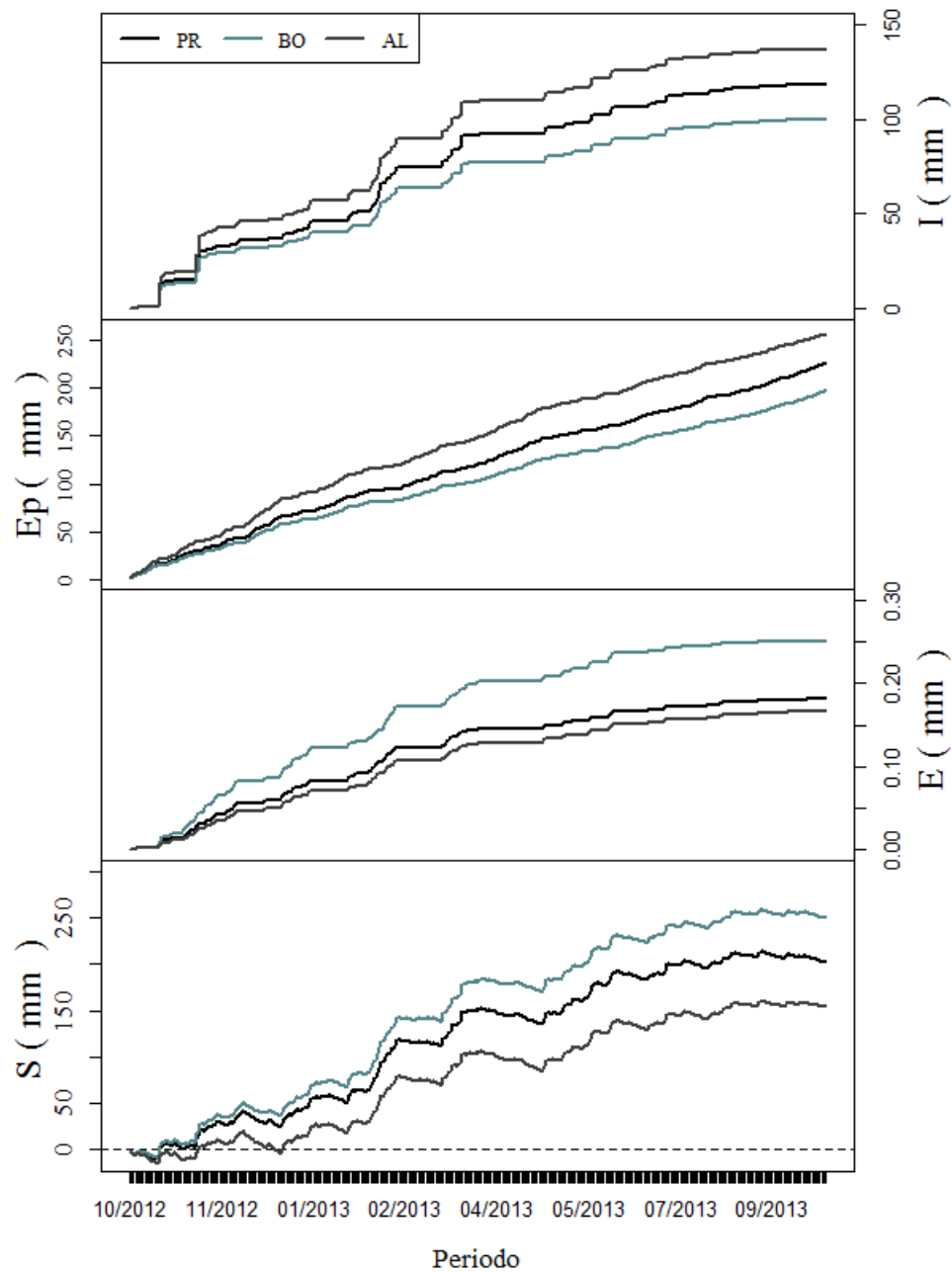


Figura 23: Infiltración (I), Evaporación potencial (Ep), escorrentía superficial (E), y Almacenamiento (S) acumulados por cobertura

Tabla 9: Valor acumulado de las variables al final del periodo (mm)

Variable	PR	BO	AL
I	118.36	99.83	138.86
Ep	225.86	196.86	255.33
E	0.01	0.02	0.016
S	202.17	249.70	160.65

Para finalizar la sección del flujo de agua, se obtuvieron los promedios de las simulaciones en función de la posición topográfica, es decir la ubicación alta, media o baja en la ladera. En la Figura 24 y Figura 25 se presentan los flujos acumulados al final del periodo y los diarios, respectivamente. Los valores alcanzados por cada proceso al final del periodo de estudio se exponen en la Tabla 10. Se puede decir que existe, según las simulaciones realizadas, una acumulación ligeramente mayor en las posiciones topográficas altas con respecto a la media y baja, siendo superior en un 9 y 10 % respectivamente; esto podría ocurrir dado que la modelación no considera los efectos de la ladera, por tratarse de una simulación 1D.

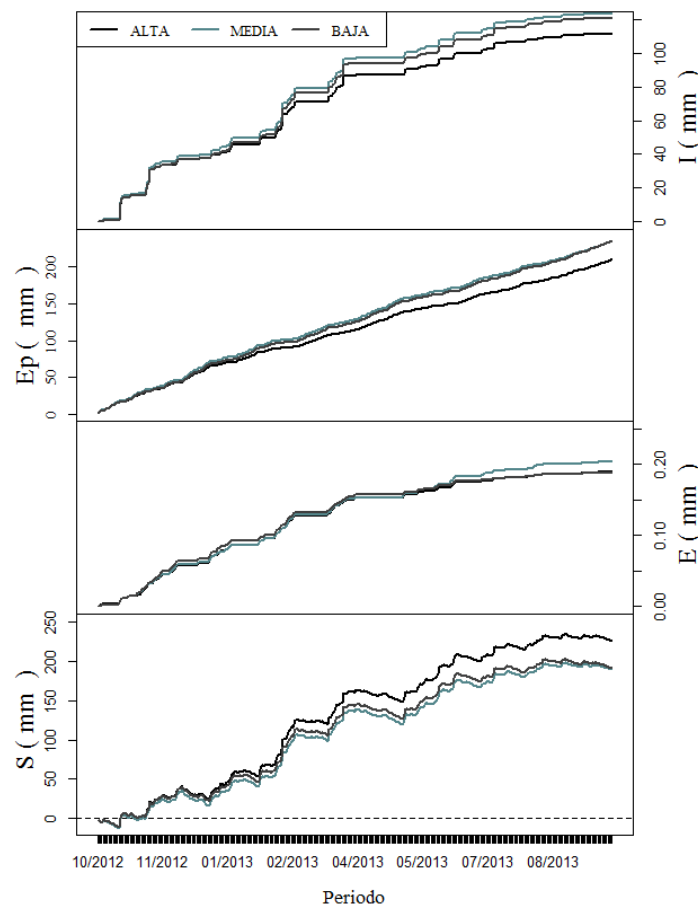


Figura 24: Infiltración (I), Evaporación potencial (Ep), escurrentía (E), y Almacenamiento (S) acumulados según la topografía

Tabla 10: Valor acumulado de las variables al final del periodo (mm) según ubicación en la ladera

	I	Ep	E	S
ALTA	111.08	209.35	0.19	225.79
MEDIA	116.83	222.99	0.20	206.38
BAJA	115.78	227.07	0.18	203.37

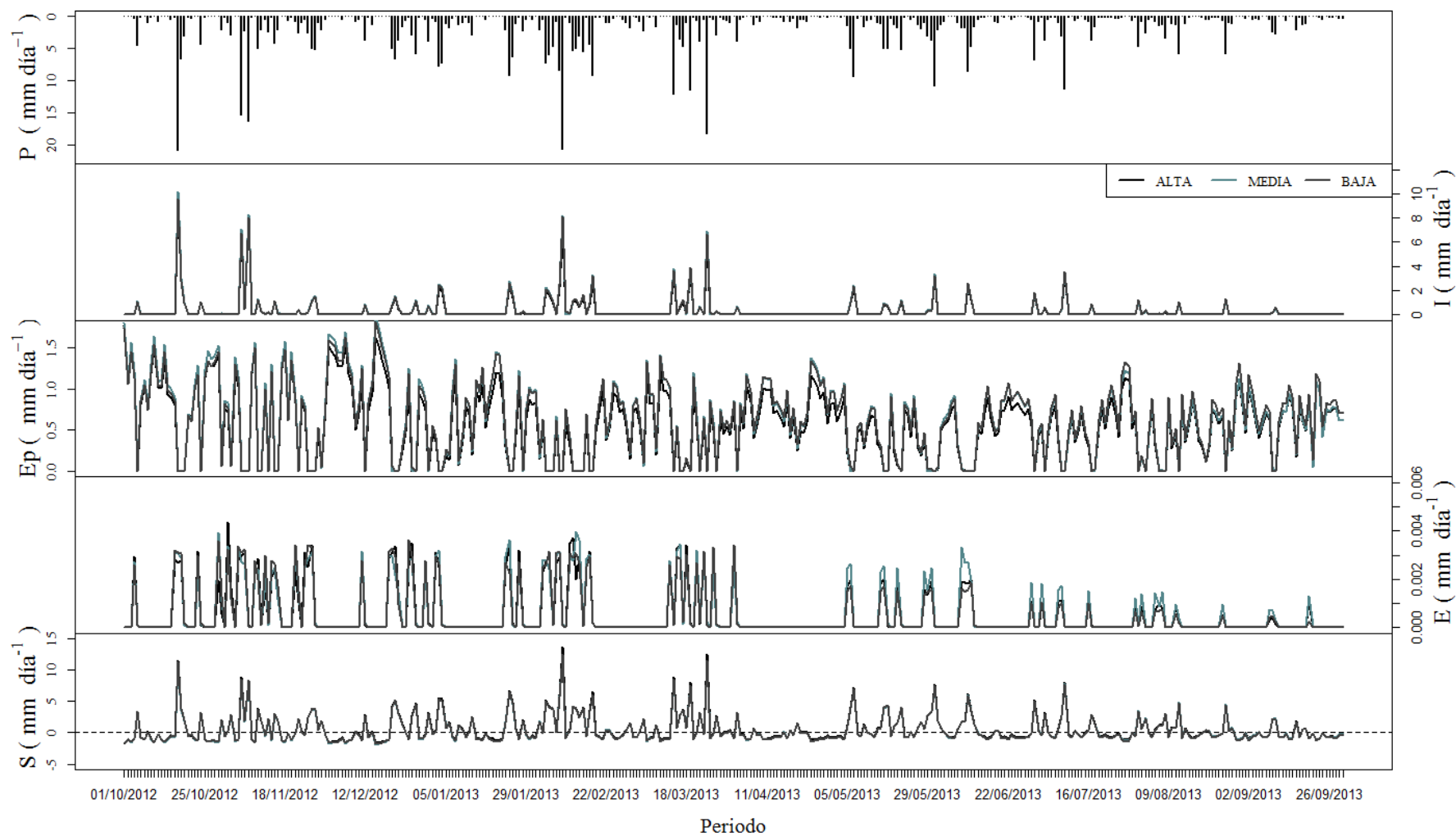


Figura 25: infiltración (I), evaporación potencial (Ep), escorrentía (E) y Almacenamiento (S) promedios simulados según la topografía

3.5 Cargas promedio diarias de nitrato y acumuladas al final de periodo de estudio

A diferencia del análisis anterior en el cual se consideró el flujo de agua promedio en la calicata, el análisis de la concentración de nitrato se realizó específicamente a la profundidad de muestreo. La Figura 26 y Figura 27 presentan las concentraciones promedios diarias simuladas por cobertura de suelo y topografía, respectivamente. Entre los tipos de cobertura de suelo se puede apreciar una diferencia notable entre las concentraciones alcanzadas bajo la cobertura de bosque, las mismas que son casi ocho veces mayores que las alcanzadas bajo la cobertura de páramo y almohadilla a escala diaria. Entre posiciones topográficas se observa que las concentraciones en la pendiente media presentan valores de aproximadamente dos veces mayores a las concentraciones observadas en la pendiente alta y baja.

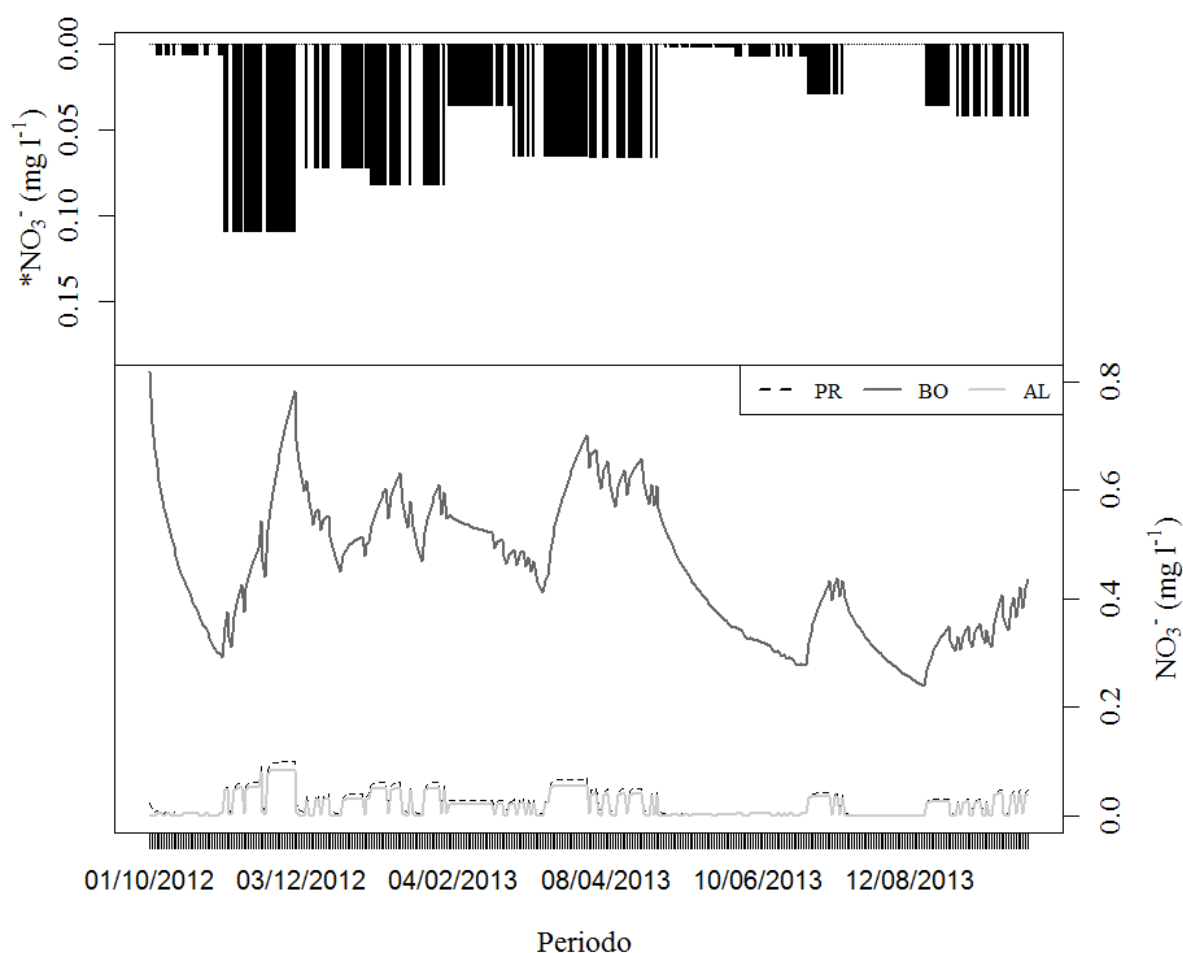


Figura 26: concentración diaria promedio de nitrato por cobertura de suelo.

*Corresponde a la concentración del ion en el agua de lluvia

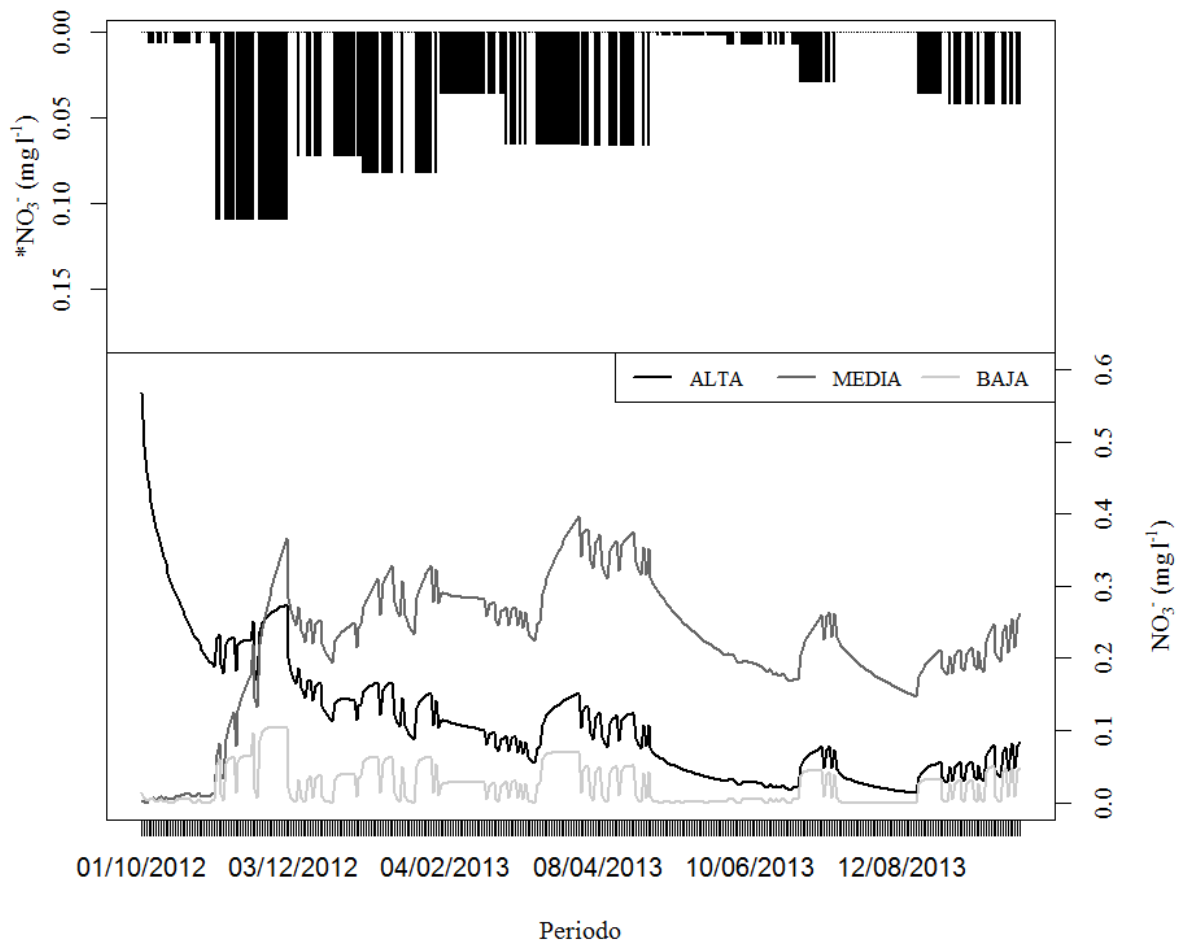


Figura 27: concentración promedio diaria de nitrato por topografía

La carga promedio anual para cada cobertura del suelo y posición topográfica se detalla en la Figura 28. Se observa que la cobertura de bosque presenta un 94% y 95% de carga promedio mayor que las obtenidas bajo la cobertura de páramo y almohadilla, respectivamente. Mientras que las cargas alcanzada bajo las coberturas de páramo y almohadilla son similares. Por otro lado, la carga promedio anual en la posición topográfica media es aproximadamente dos veces mayor comparada a la posición topográfica alta y casi diez veces mayor a la posición topográfica baja. Al analizar los resultados de las cargas alcanzadas comparándolas con la carga promedio anual entrante por deposición atmosférica a través de la lluvia (0.17 Kg ha^{-1}) se puede decir que el suelo bajo bosque en gran medida exporta nutrientes a través de la lixiviación. La deposición atmosférica se calculó como el producto de la lluvia anual caída sobre la zona de estudio y la concentración promedio anual de nitrato registrado en la lluvia; por otro lado, las cargas lixiviadas se estimaron como el producto de la infiltración promedio anual modelada y la concentración de nitrato promedio anual modelada en el suelo.

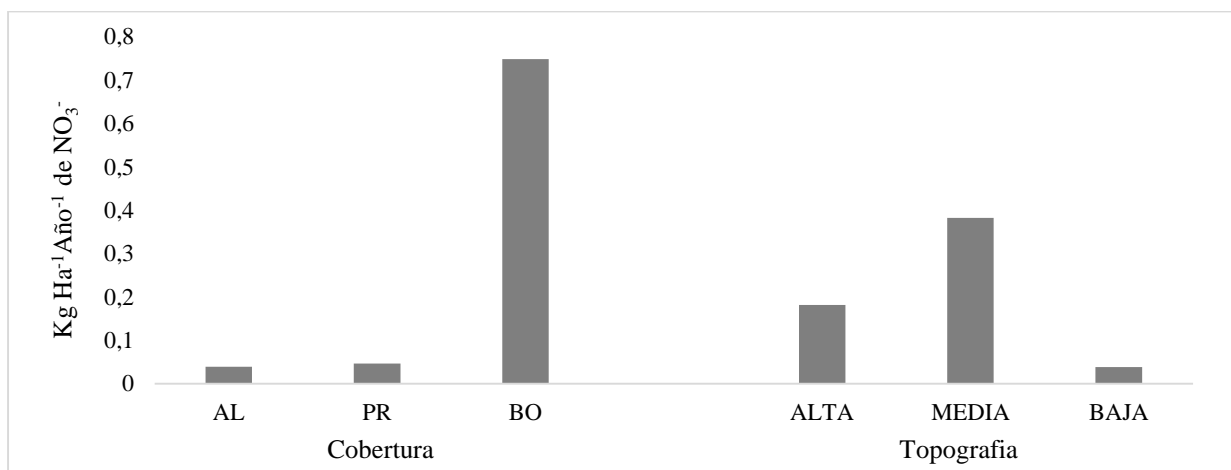


Figura 28: carga promedio anual de nitrato lixiviado por tipo de cobertura y posición topográfica

4 DISCUSIÓN

En este estudio, se ha llevado a cabo la modelación hidrológica de flujo de agua en el perfil del suelo y la modelación del nitrato. Para comprender el efecto de la vegetación en los flujos de agua y solutos se consideraron los siguientes tipos de cobertura: pajonal (páramo), bosque (polylepis) y almohadillas. Además se analizó el efecto de la posición topográfica a lo largo de la pendiente. La modelación contempló la simulación de los flujos de agua y nitrato a través del suelo, en treinta perfiles de suelo o calicatas distribuidos en la microcuenca Cuevas (4.2 km²); quince de estas calicatas fueron ubicadas bajo vegetación de páramo, nueve bajo almohadilla y seis bajo bosque. El modelo Hydrus 1D fue empleado con el propósito de optimizar parámetros hidrofísicos y transporte del ion nitrato, y finalmente simular los flujos a nivel diario a lo largo del periodo de estudio (2012-2013). Los resultados alcanzados permitieron llevar a cabo un análisis por tipo de cobertura y topografía.

4.1 Modelización

La evaluación del ajuste de las simulaciones a la tensión y concentración en el suelo observadas, demuestran un desempeño satisfactorio del modelo Hydrus 1D, considerando principalmente el coeficiente PBIAS. No así con NSE y RSR, para los cuales el desempeño es pobre o no satisfactorio, lo cual difiere de la literatura en la cual se pueden encontrar ajustes muy buenos de NSE y RMSE (Wang et al., 2010). De manera general, se puede decir que las simulaciones presentan un sesgo de sobrestimación en cuanto a las tensiones, y uno de subestimación en las concentraciones de nitrato (Moriasi et al., 2007).

Varios de los estudios desarrollados sobre los suelos de páramo (Buytaert et al., 2006; Buytaert et al., 2005; Crespo et al., 2010; Poulénard et al., 2001), han demostrado las altas capacidades de retención de agua que poseen los andosoles. De los parámetros optimizados, correspondientes al modelo de Van Genuchten (1980), las curvas de retención ajustadas en esta investigación presenta una capacidad de retención de agua superior a 0.8 cm³ cm⁻³ en capacidad de campo, para el horizonte A, en especial bajo las coberturas de páramo y bosque. Si bien las

capacidades de retención alcanzadas son elevadas, se ha evidenciado que estas podrían ser superiores a $0.95 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, atribuyéndosele principalmente al contenido alto de materia orgánica asociadas con minerales de arcilla amorfa como alófana e imogolita (Wouter Buytaert et al., 2005). En cuanto a la retención en punto de marchitez (pF 4), se obtuvieron valores más bajos que los encontrados en la literatura, que reporta capacidades de retención sobre los $0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; podría decirse que, bajo estas condiciones, el suelo de los horizontes A se comporta como un suelo arcillo limoso. El horizonte AC presenta un comportamiento similar al A, con retenciones cercanas pero inferiores a $0.8 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; en este horizonte la retención que ocurre bajo bosque presenta una capacidad hasta dos veces mayor a la que tienen las otras coberturas en punto de marchitez. A pesar de que se alcanzaron retenciones más bajas a la reportada en la literatura para pF 4, las curvas ajustadas guardan similitud a aquellas obtenidas por medio del uso del modelo de Mualem – Van Genuchten en Buytaert et al. (2005); según su estudio el comportamiento de las curvas obtenidas podrían explicarse dado que el modelo de ajuste es físicamente basado, en el cual el suelo es insensible a la presión del aire, por lo tanto el agua es gradualmente liberada hasta llegar al contenido residual de agua, aproximándose al punto de marchitez.

En cuanto a los parámetros utilizados en la modelación del transporte de nitrato se optimizaron valores muy bajos de densidad aparente, típicas de los suelos de páramo (Wouter Buytaert et al., 2005; De Bièvre et al., 2006; Poulenard et al., 2003). Lo más relevante con respecto a la modelación de nitrato fue la optimización de tasas de decaimiento de primer orden (Figura 21); es necesario mencionar, nuevamente, que estas tasas abarcarían los procesos que actúan principalmente sobre los nitratos en el suelo, es decir, mineralización, inmovilización, aprovechamiento vegetal, y desnitrificación. Sería importante que futuras investigaciones se centren en la determinación de tasas propias para cada proceso citado, como lo encontramos en Li et al. (2015). Por el momento se puede mencionar la notable diferencia que existe entre las tasas alcanzadas bajo la cobertura de bosque, cuya media es hasta tres veces menor a la presentada bajo las otras coberturas.

4.2 Efecto de la vegetación

En los ecosistemas de páramo el clima y los suelos ejercen los mayores controles sobre la regulación hídrica (De Bièvre et al., 2006). Sin embargo, la vegetación y la topografía pueden afectar fuertemente la hidrología del suelo. En la presente investigación se ha encontrado diferencias entre las diferentes coberturas del suelo analizadas. Suelos formados bajo la vegetación de bosque presentan una capacidad de almacenamiento de agua hasta 10% mayor que en suelos formados bajo las coberturas de páramo y almohadilla. Esta capacidad de almacenamiento más elevada podría ser atribuida al tipo de follaje. El bosque de polylepis está constituido por árboles grandes ($> 5 \text{ m}$) y especies arbustivas, los cuales se caracterizan por tener hojas anchas y ramas largas. La presencia de niebla y nubosidad en la zona podría ocasionar un aumento de la cantidad de agua que llega al suelo, en la forma de gotas de agua, debido a la intercepción de la niebla y nubes por parte de la vegetación alta, de esta manera contribuyen a la humedad del suelo. Este proceso no se observa o es casi inexistente en suelos

con cobertura de páramo y almohadillas que están constituidas por una vegetación pequeña. Estudios en áreas de bosque nublado montano han demostrado que la contribución de la precipitación a través de la intercepción de las nubes y niebla puede llegar hasta el 20% de la lluvia ordinaria (Bruijnzeel, 2004); en una investigación reciente, se ha estimado que el pajonal de páramo podría interceptar un 80% de la precipitación en eventos pequeños, y cerca de un 10% en eventos de fuerte intensidad (Ochoa-Sánchez et al., 2018). Hay que considerar que el modelo podría estar subestimando la alta capacidad de almacenamiento de la almohadilla, esto podría explicarse debido al pobre ajuste alcanzado en la simulación bajo esta cobertura.

A pesar de un mayor almacenamiento observado en el suelo bajo la vegetación de bosque, sin embargo este suelo demuestra tener la menor infiltración, siendo esta un 28 y 14 % menor en los suelos bajo la cobertura de almohadilla y páramo, respectivamente. Este resultado sugiere que el consumo hídrico del bosque de polylepis es mayor comparado a la vegetación de almohadillas y páramo como resultado del área superficial grande del follaje y un sistema radicular profundo. Por otro lado, la escorrentía producida bajo las tres coberturas (Figura 23) resultó ser despreciable en el periodo de estudio. Este resultado confirma la buena permeabilidad de los suelos de páramo debido a las extraordinarias propiedades físicas (Asanza y Barahona, 2015). La alta porosidad, baja densidad aparente, alta materia orgánica y una buena cobertura vegetal hacen de los suelos inhabilitados para generar escorrentía superficial.

La carga promedio de nitrato presenta un comportamiento claramente distinto bajo la cobertura de bosque que aquellas bajo las coberturas de páramo y almohadilla; así, bajo la vegetación de bosque se estimó una carga promedio anual de $0.74 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que supera en 20 veces a las alcanzadas bajo las otras coberturas. De igual forma, esta carga anual sería cuatro veces superior a la carga anual entrante como deposición atmosférica por medio de la lluvia. Dado que en esta investigación se utilizaron tasas de decaimiento de primer orden para simular el agotamiento del nitrato a través del perfil, bajo la cobertura de bosque el nitrato parecería estar siendo acumulado. Esto podría explicarse debido al contenido alto de materia orgánica en el suelo en el cual significantes cantidades de nitrógeno pueden ser almacenadas en formas orgánicas lo que llevaría a la acumulación de la masa de nitrato que ingresa al suelo. Un comportamiento similar fue encontrado por Wang et al. (2010), quienes observaron un incremento de la concentración a medida que el nitrato alcanzaba un suelo profundo. Se debe considerar también que no se conocen las atribuciones de nitrato depositadas vía flujo de tallos ni producto de la lluvia horizontal o neblina; concentraciones de este ion dentro de estos flujos pueden ser significativamente mayores que las encontradas en la precipitación (Oyarzún et al., 2004). Este incremento de concentración es eventualmente producto de la interacción de la lluvia con el follaje, mismo que capta parte de la deposición húmeda del nitrógeno (Borken y Matzner, 2004). Por este proceso podríamos considerar una subestimación de los aportes de nitrato en el suelo, y por ende en las entradas determinadas en la modelación.

Realizar una comparación de la tasa de carga lixiviada calculada en este estudio con la encontrada en otras investigaciones podría resultar ambiguo; esto dado que la carga se encuentra en función de la cantidad de agua infiltrada, y esta a su vez depende de factores como

la precipitación sobre el área de estudio, la interceptación, tipo de suelo y cobertura vegetal, entre otras. Sin embargo, podemos citar el caso de Oyarzún et al., (2004), quienes reportan una tasa de lixiviación, en un bosque prístino en una cuenca al sur de los andes chilenos (924-1402 m.s.n.m), de hasta $6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; es importante tener en cuenta que la precipitación anual caída sobre su zona de estudio alcanza los 7000 mm anuales. En otra región, Borken y Matzner, (2004) investigaron la lixiviación de nitrógeno en 57 puntos distribuidos en los bosques de toda Alemania, encontrando una carga de lixiviación media anual de 5.8 y $1.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de nitrógeno bajo picea y haya (bosques de altura); los autores concuerdan con que las diferencias encontradas pueden ser explicadas por las cantidades de precipitación, y la distribución regional y climática de los bosques. Por otro lado, en el estudio de Kortelainen et al., (1997), quienes estudiaron la lixiviación de nitrógeno en 22 cuencas en Finlandia, se calcularon tasas de lixiviación de entre 0.028 y $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de NO_3^- , más cercanas a las determinadas en este estudio; cabe recalcar que las cuencas analizadas presentaban importantes porcentajes de suelo de turba (peatlands). A nivel local, se tiene escasa información sobre la lixiviación de nutrientes en suelo de páramo, sin embargo se puede citar el estudio de Bucker et al., (2011) quienes reportan tasas de exportación de nitrato en cauces de micro cuencas alto andinas con cobertura boscosa (diferente a polylepis) de entre 19 y $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \text{NO}_3^-$.

4.3 Efecto de la topografía

Al igual que la vegetación, la topografía desempeña un rol importante en la distribución espacial de la humedad del suelo. Sin embargo esta suposición fue apenas encontrada en nuestro estudio. Los resultados muestran que el efecto de la topografía en los flujos de agua no parece tener un efecto marcado. Para comprobarlo se calculó la correlación de los flujos acumulados al final del periodo y la pendiente para cada uno de los puntos simulados. Como se puede apreciar en la Figura 29 las correlaciones obtenidas son muy bajas. Sería necesario levantar información de una mayor cantidad de puntos de monitoreo y bajo condiciones de pendiente semejantes para comprobar su relación. Por otro lado, es necesario considerar que al tratarse de una modelación 1D, el efecto de la topografía es despreciado, por lo tanto los procesos del movimiento del agua a lo largo de la pendiente son ignorados por el modelo. En cuanto a los nitratos, se encontró mayores concentraciones del ion en la topografía de pendiente media de $0.38 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo esta cerca de 10 y 3 veces mayor que en topografía baja y alta, respectivamente. Dada la estructura de las curvas de concentración promedio diaria de nitrato, no fue posible encontrar relaciones con los flujos de agua; para ello se requerían curvas más detalladas de la concentración del ion en el suelo.

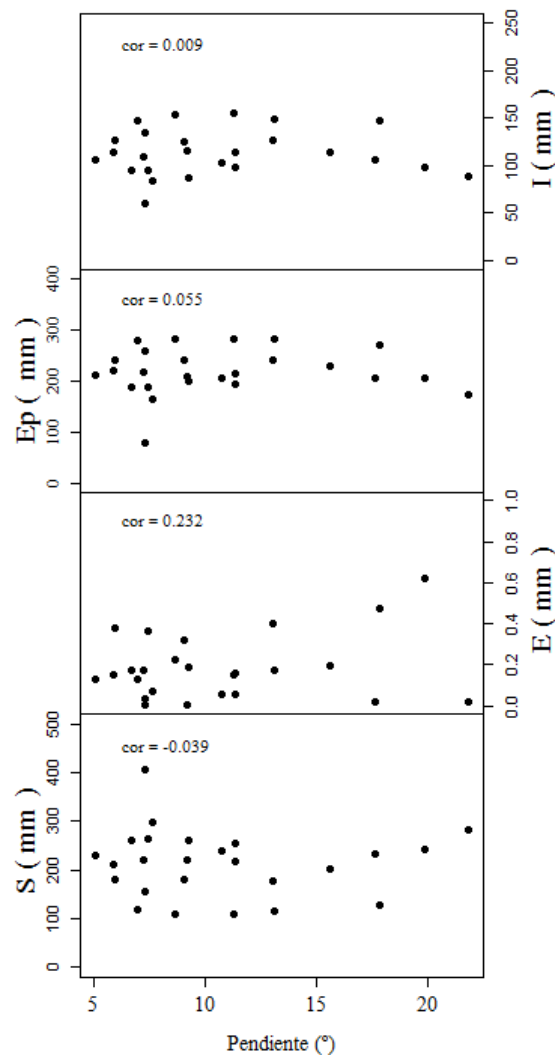


Figura 29: correlación entre el flujo acumulado de los procesos en los 27 puntos de monitoreo y la pendiente bajo la cual estos se ubican

5 CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Nuestros resultados resaltan la importancia de incorporar los tipos de especies de vegetación en la modelación hidrológica ya que diferencias significativas se encontraron en el balance hídrico del suelo, particularmente en los suelos formados bajo la cobertura de bosque donde los procesos de intercepción de la niebla y nubes son comunes en ecosistemas de páramo, y a menudo estos procesos no están incorporados en los modelos hidrológicos.

La investigación supone un importante aporte al conocimiento científico de los ecosistemas de páramo. Al integrar factores climáticos, edafológicos y de cobertura vegetal en el estudio de los flujos de agua y nitrato en el suelo, se han analizados aspectos sobre los cuales se tiene poca o ninguna información hasta el momento.

Es altamente recomendable y necesario estudiar el efecto de follaje en la redistribución de la precipitación en ecosistemas de alta montaña andinos. Incorporar sus efectos a modelaciones

similares a la desarrollada en esta investigación podría cambiar condiciones de entrada de agua y nitrato al sistema suelo. En investigaciones pasadas se ha resaltado considerables porcentajes de intercepción de la lluvia en bosques andino tropicales (Veneklaas y Van Ek, 1990). Por otro lado, se ha abordado los procesos de cambio, enriquecimiento o agotamiento, en la concentración de iones y aniones en el agua de lluvia a su paso a través del follaje vegetal (Laclau et al., 2003); sería de interés, contar con investigaciones dirigidas a cubrir estos vacíos de información en los sistemas locales, e incorporarlos a modelaciones futuras.

Dado que se considera que el suelo de páramo deriva principalmente de cenizas volcánicas producidas en el Holoceno (Poulenard et al., 2003), y que se registran bajas concentraciones de nitrato depositados vía deposición atmosférica (precipitación directa), podría considerarse a los páramos del sur ecuatoriano como ecosistemas en estado de acumulación, debido en gran medida a los contenidos altos de materia orgánica que están enlazados a los iones de nitrógeno.; esto sin embargo requerirá de investigaciones enfocadas en el tema. De ser así, resulta de interés que investigaciones futuras estudien a mayor profundidad cuales serían los principales actores que intervienen en el aprovechamiento y fijación de este nutriente en suelo de páramo, y su dinámica bajo las coberturas propias del medio. Como lo mencionan Rennenberg et al. (2009), bajo este tipo de ecosistemas las plantas competirían activamente con los microorganismos en el suelo por el aprovechamiento del nitrógeno. Por otro lado, los potenciales efectos del cambio climático supondrían dinámicas alteradas (Rennenberg et al., 2009). Sin duda hay una necesidad urgente por conocer en mayor profundidad la dinámica de los nutrientes en ecosistemas de páramo.

Entre las principales limitaciones que tuvo el estudio se pueden mencionar las siguientes:

- i. La consideración de un movimiento unidimensional del agua y del nitrato con este, dejaría de lado el movimiento lateral o subsuperficial de estos elementos en el suelo. Por otro lado, el uso de un modelo unidimensional podría justificarse dado que en capas de suelo profundas el flujo gravitacional unidimensional de agua y nitrato podría prevalecer (Tafteh y Sepaskhah, 2012).
- ii. No se incluyeron como elementos de la modelación a las características morfológicas de cada cobertura, tales como profundidad de raíces o altura de plantas; se consideró más bien, y con fines de simplificación, como implícito el efecto de cada tipo de cobertura, estando tal efecto reflejado en las tensiones y concentraciones de nitrato observadas.
- iii. No se contó con datos físico químicos ni de las propiedades hidrofísicas del suelo propios del área de estudio por lo que se recurrió a los encontrados en la bibliografía.
- iv. Un número reducido de datos observados tanto de tensión como de concentraciones de nitratos en el suelo. Disponer de una mayor cantidad de observaciones representaría la oportunidad de incorporar a la modelación factores como la estacionalidad, además de poder determinar periodos de entrenamiento y prueba más extensos en el proceso de calibración y validación del modelo.

De la experiencia de la modelación, se puede decir que las condiciones iniciales son críticas en el desempeño del modelo. Se puede también hacer mención al punto inicial dado en la

optimización inversa de los parámetros, que tiene un efecto notable en el ajuste; esto se debe principalmente al funcionamiento del algoritmo (Marquardt, 1963). El tiempo requerido en la optimización es también considerable teniendo en cuenta el número de observaciones disponibles; con un promedio de 15 y 40 minutos para ajustar tensiones y concentraciones simuladas a las observadas, respectivamente. Se recomienda tener presente cada una de las necesidades y requerimientos del programa en modelaciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., others, 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO Rome 300, D05109.
- Armijos, M., De Bièvre, B., 2014. El páramo como proveedor de servicio ambiental primordial, el agua, in: Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos. pp. 198–204.
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León-Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., Cárdenas, A., Velástegui, A., 2009. Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador.
- Beniston, M., 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts, in: Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present & Future. Springer, pp. 5–31.
- Beniston, M., Díaz, H.F., Bradley, R.S., 1997. Climatic change at high elevation sites: an overview. Kluwer Acad. Publ. 36, 233–251.
- Borken, W., Matzner, E., 2004. Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci. 167, 277–283. <https://doi.org/10.1002/jpln.200421354>
- Bücker, A., Crespo, P., Frede, H.-G., Breuer, L., 2011. Solute behaviour and export rates in neotropical montane catchments under different land-uses. J. Trop. Ecol. 27, 305–317. <https://doi.org/10.1017/S0266467410000787>
- Buytaert, W., Beven, K., 2011. Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. Hydrol. Process. 25, 1784–1799. <https://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R., 2006. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth-Sci. Rev. 79, 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., Deckers, J., 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. Hydrol. Process. 19, 3985–3997. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Buytaert, Wouter, Wyseure, G., De Bièvre, B., Deckers, J., 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. Hydrol. Process. 19, 3985–3997.
- Cammeraat, E.L., Seijmonsbergen, A.C., Sevink, J., Hoogzaad, Y.P., Stoops, W.S., Vet, S.J.D., Vries, M.E.D., Veelen, M.V., Weiler, H.A., Weiss, N., Sánchez-Vega, I., Chunga-Castro, F., Rabanal, M.R., 2014. Calidad del agua en relación con las propiedades del geosistema: Un estudio de caso de una zona de jalca cerca de Cajamarca, Perú.
- Campbell, G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci. 117, 311–314.

- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., Feyen, J., 2007. Space-time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrol. Process.* 21, 3316–3327.
- Céleri, R., Willems, P., Feyen, J., 2015. Evaluation of a data-based hydrological model for simulating the runoff of medium sized Andean basins. *Maskana* 1, 61–77.
- Cisneros, F., Timbe, E., Bièvre, B.D., Feyen, J., 2001. Utilización de la infiltración lateral (subsUPERficial) en terrenos de altas pendientes (> 12 por ciento) como un método de riego alternativo, in: III Encuentro de Las Aguas. IICA, pp. 1–9.
- Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., De Bièvre, B., 2010. Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems.
- Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L.D., De Bièvre, B., Posner, J., others, 2014. Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos.
- De Bièvre, B., Iñiguez, V., Buytaert, W., 2006. Hidrología del páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad. *Páramo* 21, 26–44.
- Diaz, H.F., Grosjean, M., Graumlich, L., 2003. Climate variability and change in high elevation regions: past, present and future, in: *Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present & Future*. Springer, pp. 1–4.
- Dippenaar, M., van Rooy, J., Breedts, N., Huisamen, A., Muravha, S., Mahlangu, S., Mulders, J., 2014. *Vadose Zone Hydrology: Concepts and Techniques* (No. TT 584/13). Water Research Commission.
- FAO, 2009. *Guía para la Descripción de Suelos*. Roma.
- Graham, D.N., Butts, M.B., 2005. Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. *Watershed Models* 849336090, 245–272.
- Hanson, B.R., Šimůnek, J., Hopmans, J.W., 2006. Evaluation of urea–ammonium–nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agric. Water Manag., Responsible Management of Water in Agriculture* 86, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.013>
- Heatwole, K.K., McCray, J.E., 2007. Modeling potential vadose-zone transport of nitrogen from onsite wastewater systems at the development scale. *J. Contam. Hydrol., Issues in urban hydrology: The emerging field of urban contaminant hydrology* 91, 184–201. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.08.012>
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., Cerra, M., 2014. Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo. UICN, Quito, Ecuador.
- IAMGOLD, 2009. Establecimiento de la línea base en hidrología para los páramos de Quimsacocha y su área de influencia. Cuenca, Ecuador.
- Iñiguez, V., Borja, P., Crespo, P., Cisneros, F., 2008. Importancia de la hidropedología en la determinación de procesos hidrológicos a escala de ladera en zonas de páramo. Presented at the XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.
- Jury, W.A., Gardner, W.R., Gardner, W.H., 1991. *Soil Physics*. John Wiley, New York.
- Kortelainen, P., Saukkonen, S., Mattsson, T., 1997. Leaching of nitrogen from forested catchments in Finland. *Glob. Biogeochem. Cycles* 11, 627–638.
- Laclau, J.-P., Ranger, J., Bouillet, J.-P., de Dieu Nzila, J., Deleporte, P., 2003. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo: 1. Chemical composition of rainfall, throughfall and stemflow solutions. *For. Ecol. Manag.* 176, 105–119.
- Li, Y., Šimůnek, J., Zhang, Z., Jing, L., Ni, L., 2015a. Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D. *Agric. Water Manag.* 148, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.010>

- Li, Y., Šimůnek, J., Zhang, Z., Jing, L., Ni, L., 2015b. Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D. *Agric. Water Manag.* 148, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.010>
- Llambí, L.D., Werschitz, S., Alejandra, I., Céleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., Borja, P., 2012. Ecología, hidrología y suelos del páramo.
- Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.* 11, 431–441.
- Mohanty, B.P., Van Genuchten, M.T., 1996. 13 An Integrated Approach for Modeling Water Flow and Solute Transport in the Vadose Zone. *Appl. GIS Model. G Non-Point Source Pollut. Th E Vadose Zone* 217–232.
- Mora, D.E., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., Willems, P., 2014. Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 631–648. <https://doi.org/10.5194/hess-18-631-2014>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., Crespo, P., 2015. Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo: mediante el uso de los isótopos estables deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$). *Maskana* 3, 87–105.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I- a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., Céleri, R., 2018. Quantification of rainfall interception in the high Andean tussock grasslands. *Ecohydrology* 11, e1946.
- Oyarzún, C.E., Godoy, R., De Schrijver, A., Staelens, J., Lust, N., 2004. Water chemistry and nutrient budgets in an undisturbed evergreen rainforest of southern Chile. *Biogeochemistry* 71, 107–123.
- Perfect, E., Sukop, M.C., Haszler, G.R., 2002. Prediction of dispersivity for undisturbed soil columns from water retention parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 696–701.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Herbillon, A.J., 2003. Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma* 117, 267–281.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.-L., Collinet, J., 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45, 185–207.
- Rennenberg, H., Dannenmann, M., Gessler, A., Kreuzwieser, J., Simon, J., Papen, H., 2009. Nitrogen balance in forest soils: nutritional limitation of plants under climate change stresses. *Plant Biol.* 11, 4–23. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00241.x>
- Sevink, J., Tonneijck, F.H., Kalbitz, K., Cammeraat, E., 2014. Dinámica del carbono en los ecosistemas de páramo de los Andes neotropicales: Revisión de literatura sobre modelos y parámetros relevantes.
- Shaffer, M.J., Ma, L., Hansen, S. (Eds.), 2001. Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management. Lewis Publishers, Boca Raton, Fla.
- Šimůnek, J., 2005. Models of water flow and solute transport in the unsaturated zone. *Encycl. Hydrol. Sci.*
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.T., 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Departament of Enviromental Sciencies University od California Riverside, Riverside, California.

- Simunek, J., Sejna, M., Van Genuchten, M.T., Šejna, M., Jacques, D., Mallants, D., Saito, H., Sakai, M., 1998. HYDRUS-1D. Simulating One-Dimens. Mov. Water Heat Mult. Solutes Var.-Satur. Media Version 2.
- Šimunek, J., Van Genuchten, M.T., Šejna, M., 2006. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Tech. Man. Version 1, 241.
- Soil Texture Calculator | NRCS Soils [WWW Document], n.d. URL https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167 (accessed 6.6.18).
- Tafteh, A., Sepaskhah, A.R., 2012. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agric. Water Manag.* 113, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.011>
- Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., Van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., Van Diepen, C.A., 1997. Theory of SWAP version 2.0; Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. DLO Winand Staring Centre [etc.].
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Vanderborght, J., Vereecken, H., 2007. Review of dispersivities for transport modeling in soils. *Vadose Zone J.* 6, 29–52.
- Vázquez, R.F., Feyen, J., 2010. Rainfall-runoff modelling of a rocky catchment with limited data availability: Defining prediction limits. *J. Hydrol.* 387, 128–140.
- Veneklaas, E.J., Van Ek, R., 1990. Rainfall interception in two tropical montane rain forests, Colombia. *Hydrol. Process.* 4, 311–326.
- Wang, H., Ju, X., Wei, Y., Li, B., Zhao, L., Hu, K., 2010. Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain. *Agric. Water Manag.* 97, 1646–1654. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.022>